



Modélisation et Simulation d'Organisations Productives Réactives: Une Approche Moiti-Agents

Yacine Ouzrout

► To cite this version:

Yacine Ouzrout. Modélisation et Simulation d'Organisations Productives Réactives: Une Approche Moiti-Agents. Modélisation et simulation. INSA de Lyon, 1990. Français. NNT : 1996ISAL0032 . tel-00838911

HAL Id: tel-00838911

<https://theses.hal.science/tel-00838911>

Submitted on 26 Jun 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE

présentée

DEVANT L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR

FORMATION DOCTORALE : INGENIERIE INFORMATIQUE

PAR

Yacine OUZROUT

(Ingénieur en Informatique)

**Modélisation et Simulation d'Organisations Productives Réactives :
Une Approche Multi-Agents**

Soutenue le 05 Avril 1996 devant la Commission d'Examen

| | | |
|-------------|----------------------------|--------------------|
| Jury | Monsieur Jean-Paul KIEFFER | Rapporteur |
| | Monsieur Joël QUINQUETON | Rapporteur |
| | Madame Jacqueline AYEL | Examineur |
| | Monsieur Joël FAVREL | Examineur |
| | Monsieur Albert MATHON | Directeur de Thèse |
| | Monsieur Henri PIERREVAL | Examineur |
| | Madame Claudette SAYETTAT | Examineur |
| | Monsieur Lucien VINCENT | Examineur |

No d'ordre 96 ISAL 0032

THESE

présentée

DEVANT L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR

FORMATION DOCTORALE : INGENIERIE INFORMATIQUE

PAR

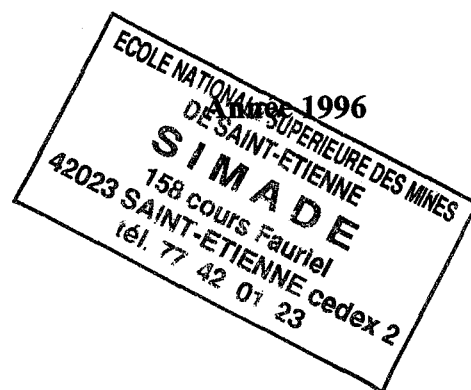
Yacine OUZROUT

(Ingénieur en Informatique)

Modélisation et Simulation d'Organisations Productives Réactives :
Une Approche Multi-Agents

Soutenue le 05 Avril 1996 devant la Commission d'Examen

| | | |
|-------------|----------------------------|--------------------|
| Jury | Monsieur Jean-Paul KIEFFER | Rapporteur |
| | Monsieur Joël QUINQUETON | Rapporteur |
| | Madame Jaqueline AYEL | Examineur |
| | Monsieur Joël FAVREL | Examineur |
| | Monsieur Albert MATHON | Directeur de Thèse |
| | Monsieur Henri PIERREVAL | Examineur |
| | Madame Claudette SAYETTAT | Examineur |
| | Monsieur Lucien VINCENT | Examineur |



1000

1000



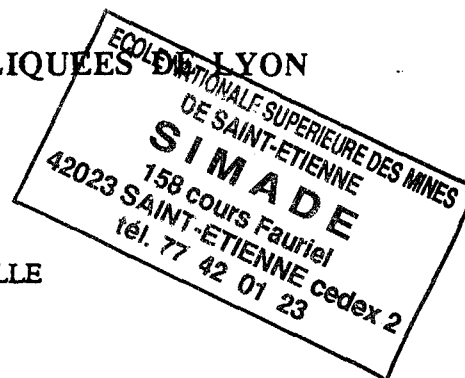
INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

Directeur : J.ROCHAT

Professeurs :

S. AUDISIO
 J.C. BABOUX
 J. BAHUAUD
 B. BALLAND
 D. BARBIER
 G. BAYADA
 C. BERGER (Melle)
 M. BETEMPS
 J.M. BLANCHARD
 C. BOISSON
 M. BOIVIN
 H. BOTTA
 G. BOULAYE
 J. BRAU
 M. BRUNET
 J.C. BUREAU
 J.P. CHANTE
 B. CHOCAT
 B. CLAUDEL
 M. COUSIN
 L. CRONENBERGER
 M. DIOT
 A. DOUTHEAU
 J.C. DUPUY
 H. EMPTOZ
 C. ESNOUF
 G. FANTOZZI
 J. FAUCHON
 J. FAVREL
 G. FERRARIS-BESSO
 Y. FETIVEAU
 L. FLAMAND
 P. FLEISCHMANN
 A. FLORY
 R. FOUGERES
 L. FRECON
 R. GAUTHIER
 M. GERY
 G. GIMENEZ
 P. GOBIN
 P. GONNARD
 R. GOUTTE
 G. GRANGE
 G. GUENIN
 G. GUILLOT
 A. GUINET
 C. GUITTARD
 J.L. GUYADER
 J.P. GUYOMAR
 J.M. JOLION
 J. JOUBERT
 J.F. JULLIEN
 A. JUTARD
 R. KASTNER
 H. KLEIMANN
 J. KOULOUMDJIAN
 M. LAGARDE

PHYSICOCHIMIE INDUSTRIELLE
 GEMPPM
 MECANIQUE DES SOLIDES
 PHYSIQUE DE LA MATIERE
 PHYSIQUE DE LA MATIERE
 EQUIPE MOD. MATH. CALC. SC.
 CETHIL/EQ. PHYSIQUE INDUST
 AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE
 CHIMIE PHYSIQUE APPLIQUEE ET ENVIRONNEMENT
 VIBRATIONS ACOUSTIQUES
 MECANIQUE DES SOLIDES
 EQUIPE DEVELOPPEMENT URBAIN
 L.I.S.I.
 CETHIL/EQ. EQUIPEMENT DE L'HABITAT
 MECANIQUE DES SOLIDES
 THERMOCHIMIE MINERALE
 COMPOSANTS DE PUISSANCE ET APPLICATIONS
 METHODES
 CHIMIE PHYSIQUE APPLIQUEE ET ENVIRONNEMENT
 BETONS ET STRUCTURES
 CHIMIE BIOLOGIQUE
 THERMOCHIMIE MINERALE
 CHIMIE ORGANIQUE
 PHYSIQUE DE LA MATIERE
 MOD. SYST. ET REC. DES FORMES
 GEMPPM*
 GEMPPM*
 C.A.S.M.
 L.I.S.P.I.
 MECANIQUE DES STRUCTURES
 GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE
 MECANIQUE DES CONTACTS
 GEMPPM*
 L.I.S.I.
 GEMPPM*
 D.E.L.I.A.
 PHYSIQUE DE LA MATIERE
 CETHIL/EQ. EQUIPEMENT DE L'HAB.
 TRAITEMENT DU SIGNAL ET ULTRASON
 GEMPPM*
 GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE
 TRAITEMENT DU SIGNAL ET ULTRASON
 GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE
 GEMPPM*
 PHYSIQUE DE LA MATIERE
 L.I.S.P.I.
 D.E.L.I.A.
 VIBRATIONS-ACOUSTIQUE
 GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE
 L.I.S.P.I.
 GENIE MECANIQUE
 BETONS ET STRUCTURES
 AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE
 GEOTECHNIQUE
 GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE
 L.I.S.I.
 CHIMIE BIOLOGIQUE



| | |
|-------------------------|---------------------------------------|
| M. LALANNE | MECANIQUE DES STRUCTURES |
| A. LALLEMAND | CETHIL/EQ. ENERGETIQUE ET THERMIQUE |
| M. LALLEMAND (Mme) | CETHIL/EQ. ENERGETIQUE ET THERMIQUE |
| P. LAREAL | GEOTECHNIQUE |
| A. LAUGIER | PHYSIQUE DE LA MATIERE |
| Ch. LAUGIER | PHYSIOLOGIE ET PHARMACODYNAMIE |
| P. LEJEUNE | G.M.M.O. |
| C. LESUEUR | VIBRATIONS-ACOUSTIQUE |
| A. LUBRECHT | MECANIQUE DES CONTACTS |
| Y. MARTINEZ | L.I.S.P.I. |
| H. MAZILLE | PHYSICOCHIMIE INDUSTRIELLE |
| P. MERLE | GEMPPM |
| J. MERLIN | GEMPPM* |
| J.P. MILLET | PHYSICOCHIMIE INDUSTRIELLE |
| M. MIRAMOND | METHODES |
| N. MONGEREAU | GEOTECHNIQUE |
| R. MOREL | MECANIQUE DES FLUIDES |
| P. NARDON | BIOLOGIE APPLIQUEE |
| A. NAVARRO | CHIMIE PHYSIQUE APPLIQUEE ET ENVIRON. |
| M. OTTERBEIN | CHIMIE PHYSIQUE APPLIQUEE ET ENVIRON. |
| J.P. PASCAULT | MATERIAUX MACROMOLECULAIRES |
| J. PERA | MATERIAUX MINERAUX |
| G. PERACHON | THERMOCHIMIE MINERALE |
| M. PERDRIX | TRAITEMENT DU SIGNAL ET ULTRASON |
| J. PEREZ | GEMPPM* |
| Q. PHAM | L.M. M. |
| P. PINARD | PHYSIQUE DE LA MATIERE |
| J.M. PINON | L.I.S.I. |
| D. PLAY | C.A.S.M. |
| J. POUSIN | EQUIPE MOD. MATH. ET CALCUL SCIEN. |
| P. PREVOT | L.I.S.P.I. |
| R. PROST | TRAITEMENT DU SIGNAL ET ULTRASON |
| M. RAYNAUD | CETHIL/EQUIPE GMC |
| J.M. REYNOUARD | BETONS ET STRUCTURES |
| J. ROBERT-BAUDOUY (Mme) | G.M.M.O. |
| A. ROCHE | L.M.M. |
| D. ROUBY | GEMPPM* |
| P. RUBEL | L.I.S.I. |
| J.F. SACADURA | CETHIL/EQUIPE GMC |
| H. SAUTEREAU | MATERIAUX MACROMOLECULAIRES |
| S. SCAVARDA | AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE |
| D. THOMASSET | AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE |
| M. TROCCAZ | GENIE ELECTRIQUE ET FERROELECTRICITE |
| R. UNTERREINER | TRAITEMENT DU SIGNAL ET ULTRASON |
| J. VERON | CHIMIE PHYSIQUE APPLIQUEE ET ENVIRON. |
| A. VINCENT | GEMPPM* |
| G. VIGIER | GEMPPM |
| P. VUILLERMOZ | PHYSIQUE DE LA MATIERE |

Directeurs de recherche C.N.R.S. :

| | |
|---------------------|---|
| Y. BERTHIER | MECANIQUE DES CONTACTS |
| P. CLAUDY | THERMOCHIMIE MINERALE |
| M. MURAT | GEMPPM* |
| A. NOUAILHAT | PHYSIQUE DE LA MATIERE |
| M.A. MANDRAND (Mme) | GENETIQUE MOLECULAIRE DES MICROORGANISMES |

Directeurs de recherche I.N.R.A. :

| | |
|------------|----------|
| G. BONNOT | BIOLOGIE |
| S. GRENIER | BIOLOGIE |
| Y. MENEZO | BIOLOGIE |

Directeurs de recherche I.N.S.E.R.M. :

| | |
|--------------------|-------------------|
| A-F. PRIGENT (Mme) | CHIMIE BIOLOGIQUE |
| N. SARDA (Mme) | CHIMIE BIOLOGIQUE |

* GROUPE D'ETUDE METALLURGIE PHYSIQUE ET PHYSIQUE DES MATERIAUX

LISTE DES DEA ou FORMATIONS DOCTORALES

| FORMATIONS DOCTORALES | RESPONSABLES INSA | ADRESSES INSA |
|---|---------------------------|-------------------|
| Acoustique | <u>GUYADER Jean Louis</u> | Bât 303 Tél 80 80 |
| Analyse et modélisation de systèmes biologiques | NARDON Paul | Bât 406 Tél 80 86 |
| Automatique industrielle | SCAVARDA Serge | Bât 303 Tél 83 41 |
| Biochimie | LAGARDE Michel | Bât 406 Tél 82 40 |
| Chimie Inorganique | GONNARD Paul | Bât 504 Tél 81 58 |
| Conception en bâtiment et techniques urbaines | <u>MIRAMOND Marcel</u> | Bât 304 Tél 85 56 |
| DEA Informatique de Lyon | KOULOUMDJIAN Jacques | Bât 501 Tél 80 99 |
| Dispositifs de l'électronique intégrée | <u>PINARD Pierre</u> | Bât 502 Tél 82 47 |
| Génie biologique et médical | MAGNIN Isabelle | Bât 502 Tél 85 63 |
| Génie civil : sols, matériaux, structures, physique du bâtiment | <u>LAREAL Pierre</u> | Bât 304 Tél 82 16 |
| Génie Electrique | CHANTE Jean-Pierre | Bât 401 Tél 87 26 |
| Matériaux polymères et Ccomposites | <u>SAUTEREAU Henri</u> | Bât 403 Tél 81 78 |
| Mécanique | DALMAZ Gérard | Bât 113 Tél 83 03 |
| Microstructure et comportement mécanique et macroscopique des matériaux - génie des matériaux | <u>GUENIN Gérard</u> | Bât 502 Tél 82 45 |
| Productique : organisation et conduite des systèmes de production | <u>FAVREL Joël</u> | Bât 502 Tél 83 63 |
| Sciences des matériaux et des surfaces | LAUGIER André | Bât 502 Tél 82 33 |
| Sciences et techniques du déchet | <u>NAVARRO Alain</u> | Bât 404 Tél 84 30 |
| Signal, Image, Parole | GIMENEZ Gérard | Bât 502 Tél 83 32 |
| Thermique et énergétique | LALLEMAND Monique | Bât 404 Tél 81 54 |

Les responsables soulignés sont également responsables généraux

*A Mes Parents, A mes Soeurs,
A Sihem et Samy*

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au sein de l'équipe EMSI (Etude et Modélisation des Systèmes Industriels) du centre SIMADE (Sciences de l'Informatique, des Mathématiques, d'Aide à la Décision et de l'Environnement) de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur Albert MATHON, Professeur et Directeur adjoint chargé de l'enseignement et de la formation à l'Ecole des Mines de Saint-Etienne, ancien Directeur du département STRAD (Stratégie du Développement), pour m'avoir accueilli dans son équipe. Qu'il soit également remercié pour la confiance qu'il m'a constamment témoignée.

Je tiens à témoigner ma profonde reconnaissance à Monsieur Lucien VINCENT, Maître de Recherche et responsable de l'équipe Etude et Modélisation des Systèmes Industriels pour avoir dirigé mes travaux. Ses nombreux conseils, tant sur le fond que sur la forme, ont toujours été sources d'idées nouvelles, et ont permis à ces travaux d'aboutir.

Je remercie Monsieur Jean-Paul KIEFFER, Professeur à l'Université d'Aix-Marseille, et Monsieur Joël QUINQUETON, Directeur de Recherche au Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Micro-électronique de Montpellier, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être rapporteurs de cette thèse et ceci malgré les charges multiples qu'ils assument.

Mes plus vifs remerciements vont à Madame Claudette SAYETTAT, Professeur et responsable du Laboratoire des Systèmes Coopératifs à l'Ecole des Mines de Saint-Etienne, pour ses nombreux conseils et sa disponibilité, et à Madame Jaqueline AYEL, Maître de Conférence à l'Université de Chambéry pour l'intérêt qu'elle a manifesté à l'égard de ce travail et pour avoir accepté de l'examiner.

Je tiens à remercier également Monsieur Joël FAVREL, Professeur à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, et Monsieur Henry PIERREVAL, Professeur à l'Institut Français de Mécaniques Avancées de Clermont-Ferrand, pour avoir accepté d'examiner cette thèse et de participer au jury.

L'accomplissement de ce travail doit beaucoup aux membres de l'équipe Etude et Modélisation des Systèmes Industriels, je remercie donc chaleureusement Mademoiselle Marie-Agnès GIRARD, Monsieur Bertrand JULLIEN, et Monsieur Patrick BURLAT pour leur patience et pour les nombreuses réunions de travail qui ont permis à cette thèse de voir le jour.

Je tiens à exprimer ma gratitude à tous mes collègues de SIMADE (Bruno, François, Françoise, Nadia, Sophie, et tous les autres), avec une pensée pour ceux qui n'ont pas encore terminé, à Bernadette, qui nous a si bien accueilli, et à Zahia, Marie Line et Liliane qui ont contribué à rendre mon activité à l'Ecole des Mines des plus sympathiques.

Enfin, je remercie ma femme pour sa patience, son soutien et son amour, et mon fils, qui a apporté un vrai sens à ma vie.

RESUME

L'objectif de cette thèse est de proposer une démarche méthodologique de conception d'un modèle de simulation de systèmes de production qui intègre une représentation des comportements distribués et cognitifs des acteurs décisionnels, et dont l'intérêt est de permettre d'étudier la pertinence de changements organisationnels dans ces systèmes.

En effet, l'analyse des conditions d'évolution des systèmes de production et de leur contexte a permis de mettre en relief le besoin de « *réactivité* » pour faire face à un environnement de moins en moins stable et prévisible et devant lequel l'organisation doit chercher des alternatives à un fonctionnement planifié, prédictif, figé et séquentiel. Les réponses organisationnelles des entreprises à ces sollicitations s'expriment par un mouvement vers la flexibilité et l'intégration, et passent par un rapprochement entre la structure décisionnelle et la structure physique.

Pour mettre en évidence cette nouvelle réalité, nous proposons un processus de modélisation qui débute par la construction d'un modèle conceptuel de compréhension des organisations, basé sur une représentation des processus de décision, et sur une formalisation des phénomènes d'orientation des comportements décisionnels. En parallèle, nous analysons les concepts associés à la problématique des systèmes multi-agents, systèmes qui étudient l'émergence de comportements collectifs résultant de l'activité coopérative de plusieurs entités autonomes « intelligentes » sur lesquelles l'expertise est répartie. Ces études convergent vers un modèle de simulation issu des techniques de simulation à événements discrets, dans lequel nous intégrons une modélisation du système décisionnel à base d'agents. Enfin, l'implémentation de ce modèle sera basée sur des techniques de simulation orientée objets (objets actifs, programmation concurrente), et sera validée sur deux exemples, l'un pédagogique et conceptuel, l'autre industriel.

MOTS-CLES

Système production, Organisation, Prise décision, Systémique, Simulation, Intelligence Artificielle, Orienté Objet.

ABSTRACT

The aim of this work is to propose a methodology for the conception of a model for the simulation of production systems. The model will take into account the representation of the distributed and cognitive behaviors of decisional actors, and will permits de study of organizational changes.

The abandon of traditional structures, and the emergence of a new demand for more varied products, has brought uncertainty inside manufacturing systems. Market instability and rapid development of new technologies can both be considered as uncertainty factors that increase complexity inside manufacturing systems. Those systems are increasingly flexible (capacity of making varied products) and integrated. Whereas taylorist firms were faced with a relatively predictable reality, present day firms are faced to a widely unpredictable one, the flexibility which allows the firm to fit with a very unstable industrial environment cannot be simulated with a simple cybernetic structure, it is necessary to build a structure which takes the actors' autonomy into account.

Taking these points into consideration a modelling process was proposed beginning with the construction of a conceptual model for the representation of manufacturing systems. This model is a multilevel decision-making model based on an approach inspired by systemic and meta-systemic concepts. In order to describe the knowledge which influences behaviors and decision making, Multi-Agents Systems were studied as means for describing the behaviors and the interactions of autonomous actors. The model obtained was then used for simulation using Discrete Event Simulation concepts and object oriented implementation, and it was tested on two examples : the first one being conceptual and pedagogical, and the second one concerning an industrial situation.

KEYWORDS

Production System, Organization, Decision Making, Systemic, Simulation, Artificial Intelligence, Object Oriented.

SOMMAIRE

| | |
|---------------|-----------|
| RESUME | 11 |
|---------------|-----------|

| | |
|------------------------------|-----------|
| INTRODUCTION GENERALE | 21 |
|------------------------------|-----------|

CHAPITRE I

Les Organisations Productives

| | |
|------------------------|-----------|
| 1- INTRODUCTION | 25 |
|------------------------|-----------|

| | |
|---|-----------|
| 2- LES ORGANISATIONS PRODUCTIVES | 28 |
|---|-----------|

| | |
|--|-----------|
| 2.1 DESCRIPTION DES ORGANISATIONS | 28 |
|--|-----------|

| | |
|---|-----------|
| 2.2 COMPLEXITE DES ORGANISATIONS PRODUCTIVES | 29 |
|---|-----------|

| | |
|---|----|
| 2.2.1 <i>La Complexité et l'Incertitude dans les Systèmes</i> | 30 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| 2.2.2 <i>Evolution et Complexification des Systèmes</i> | 31 |
|---|----|

| | |
|-------------------------------|-----------|
| 3- MODELES DE DECISION | 32 |
|-------------------------------|-----------|

| | |
|---|-----------|
| 3.1 UNE TYPOLOGIE DES DECISIONS DANS LES ORGANISATIONS | 32 |
|---|-----------|

| | |
|---|----|
| 3.1.1 <i>Les Classifications Décisionnelles</i> | 32 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| 3.1.2 <i>Typologies des Décisions en Production</i> | 35 |
|---|----|

| | |
|--|-----------|
| 3.2 METHODES ET OUTILS D'AIDE A LA DECISION | 37 |
|--|-----------|

| | |
|--|-----------|
| 4- CONTEXTE INDUSTRIEL: EVOLUTION DES ORGANISATIONS | 38 |
|--|-----------|

| | |
|--|-----------|
| 4.1 L'EVOLUTION ORGANISATIONNELLE | 38 |
|--|-----------|

| | |
|----------------------------|----|
| 4.1.1 <i>L'Intégration</i> | 39 |
|----------------------------|----|

| | |
|-----------------------------|----|
| 4.1.2 <i>La Flexibilité</i> | 40 |
|-----------------------------|----|

| | |
|---|-----------|
| 4.2 AUTONOMIE ET PRISE DE DECISION | 42 |
|---|-----------|

| | |
|---|----|
| 4.2.1 <i>La Nécessité d'un Accroissement de l'Autonomie</i> | 43 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| 4.2.2 <i>Autonomie et Distribution de la Décision</i> | 44 |
|---|----|

| | |
|----------------------|-----------|
| 5- CONCLUSION | 44 |
|----------------------|-----------|

CHAPITRE II

Le Modèle de Compréhension : META²

| | |
|--|-----------|
| 1- INTRODUCTION | 47 |
| 2 LES PRINCIPES DE BASE | 48 |
| 2.1 LA GESTION PAR LES « ACTIVITES » | 48 |
| 2.1.1 <i>Le Concept d'Activité</i> | 48 |
| 2.1.2 <i>L'Organisation par « Processus »</i> | 49 |
| 2.2 UNE APPROCHE SYSTEMIQUE DE MODELISATION | 52 |
| 2.3 LA SIMULATION | 54 |
| 2.3.1 <i>Simulation à Evénements Discrets</i> | 55 |
| 2.3.2 <i>Modélisation des Systèmes à Evénements Discrets</i> | 56 |
| 2.3.2.1 <i>Approche par événements</i> | 56 |
| 2.3.2.2 <i>Approche par cycle d'activités</i> | 56 |
| 2.3.2.3 <i>Approche par processus</i> | 57 |
| 2.3.2.4 <i>Approche par objet</i> | 57 |
| 2.3.3 <i>Conclusion sur la Simulation</i> | 58 |
| 3 LE PROCESSUS DE MODELISATION | 58 |
| 3.1 LA MODELISATION EN PRODUCTIQUE | 58 |
| 3.1.1 <i>Méthodes d'Analyse et de Conception pour les Systèmes de Production</i> | 59 |
| 3.1.1.1 <i>La Méthode GRAI</i> | 60 |
| 3.1.1.2 <i>Le modèle CIMOSA</i> | 62 |
| 3.2 L'ANALYSE MODULAIRE DES SYSTEMES (AMS) | 64 |
| 3.2.1 <i>Description de l'AMS</i> | 65 |
| 3.3 JUSTIFICATION DU CHOIX DE L'AMS | 69 |
| 3.3.1 <i>Comparaison des Méthodes</i> | 69 |
| 3.3.1.1 <i>La Méthode CIMOSA</i> | 69 |
| 3.3.1.2 <i>La Méthode GRAI</i> | 70 |
| 3.3.1.3 <i>la Méthode AMS</i> | 71 |
| 3.3.2 <i>Possibilités d'Evolution de la Méthode</i> | 73 |
| 4 LE MODELE DE COMPREHENSION : « META² » | 75 |
| 4.1 LIMITES DE L'AMS ET EVOLUTIONS ENVISAGEES | 75 |
| 4.1.1 <i>Insuffisances de l'AMS</i> | 75 |
| 4.1.2 <i>Processus d'Orientation des Comportements</i> | 76 |
| 4.2 DESCRIPTION DU MODELE : « META² » | 80 |
| 4.2.1 <i>Eléments du Modèle « Méta² »</i> | 80 |
| 4.2.2 <i>Le Modèle « Méta² »</i> | 84 |
| 4.2.2.1 <i>Le Niveau : « Chaînes d'Activités »</i> | 84 |
| 4.2.2.2 <i>Le Niveau : « Processus Opérationnels »</i> | 85 |
| 4.2.2.3 <i>Le Niveau : « Processus Stratégiques »</i> | 86 |

5 CONCLUSION**87****CHAPITRE III****L'IAD et les Systèmes Industriels**

| | |
|--|------------|
| 1- INTRODUCTION | 89 |
| 2- DE L'IA A L'IAD | 90 |
| 2.1 INTRODUCTION | 91 |
| 2.2 FONDEMENTS THEORIQUES | 92 |
| 2.2.1 Motivations | 92 |
| 2.2.2 Problématique | 93 |
| 2.3 LE CONCEPT AGENT | 94 |
| 3- LES SYSTEMES MULTI-AGENTS (SMA) | 95 |
| 3.1 CLASSIFICATION | 96 |
| 3.1.1 Agents Cognitifs | 96 |
| 3.1.2 Agents Réactifs | 97 |
| 3.1.3 Différences entre Agents Réactifs et Agents Cognitifs | 97 |
| 3.2 ORGANISATION DES AGENTS | 99 |
| 3.2.1 Les niveaux d'organisation des sociétés d'agents | 100 |
| 3.2.2 Les structures organisationnelles | 102 |
| 3.3 LA COOPERATION | 103 |
| 3.3.1 Processus de Coopération | 103 |
| 3.3.2 La Négociation | 105 |
| 3.3.3 Le Contrôle | 106 |
| 3.4 LA COMMUNICATION | 107 |
| 3.4.1 Les Modes de Communication | 108 |
| 3.4.1.1 Communication par partage d'informations | 109 |
| 3.4.1.2 Communication par envoi de messages | 111 |
| 3.4.2 Prise en compte du temps | 114 |
| 4- APPORTS AUX SYSTEMES INDUSTRIELS | 117 |
| 4.1 ORGANISATION PRODUCTIVE ET PRISE DE DECISION DISTRIBUEE | 117 |
| 4.2 DE L'IAD A UNE VISION META-SYSTEMIQUE DE L'ORGANISATION | 118 |
| 4.3 APPORTS DE L'IAD AUX SYSTEMES INDUSTRIELS | 119 |
| 5 CONCLUSION | 122 |

CHAPITRE IV

Le modèle de Représentation a base d'Agents

| | |
|---|------------|
| 1 INTRODUCTION | 123 |
| 2 DU MODELE DE COMPREHENSION AU MODELE DE REPRESENTATION | 124 |
| 2.1 LES CENTRES DE DECISIONS | 124 |
| 2.2 LES AGENTS COGNITIFS | 125 |
| 3 ORGANISATION DE LA SOCIETE D'AGENTS | 128 |
| 4 ARCHITECTURE DES AGENTS COGNITIFS | 132 |
| 4.1 UN MODELE DE REPRESENTATION D'AGENT COGNITIF | 132 |
| <i>4.1.1 Le Module Cognitif</i> | <i>133</i> |
| <i>4.1.2 L'Unité de Contrôle</i> | <i>134</i> |
| <i>4.1.3 Le Module de Raisonnement</i> | <i>136</i> |
| <i>4.1.4 Le Module de Communication</i> | <i>138</i> |
| <i>4.1.5 Le Module de Perception</i> | <i>139</i> |
| 4.2 SYNTHESE : CYCLE D'UN AGENT | 141 |
| 5 LA COMMUNICATION | 141 |
| 5.1 AVEC QUI COMMUNIQUER ? | 143 |
| <i>5.1.1 Entre les niveaux (Hiérarchie)</i> | <i>143</i> |
| <i>5.1.2 A un même niveau (Dépendance)</i> | <i>143</i> |
| <i>5.1.3 Dans le cas d'une organisation de type « Effet de Groupe »</i> | <i>145</i> |
| 5.2 QUAND COMMUNIQUER ? | 145 |
| <i>5.2.1 L'activation des mécanismes de prise de décision</i> | <i>145</i> |
| <i>5.2.2 La synchronisation entre Agents</i> | <i>146</i> |
| 5.3 COMMENT COMMUNIQUER ? | 147 |
| <i>5.3.1 Type de Communication</i> | <i>147</i> |
| <i>5.3.2 Mode de diffusion</i> | <i>148</i> |
| <i>5.3.3 Interprétation des messages</i> | <i>148</i> |
| 5.4 QUE COMMUNIQUER ? | 149 |
| 6 LA RESOLUTION DE CONFLITS | 153 |
| 7 CONCLUSION | 154 |

CHAPITRE V

Le Modèle de Simulation

| | |
|---|------------|
| 1 INTRODUCTION | 155 |
| 2 ENVIRONNEMENT DE DEVELOPPEMENT | 156 |
| 2.1 MODELE ADOPTE | 156 |
| 2.2 LE CONCEPT D'OBJET ACTIF | 158 |
| 2.2.1 <i>Un Modèle d'Acteur à base d'Objets Actifs</i> | 159 |
| 2.2.2 <i>Des Objets aux Agents</i> | 160 |
| 2.3 TECHNIQUE D'IMPLEMENTATION | 162 |
| 2.3.1 <i>Solution Choisie</i> | 162 |
| 2.3.2 <i>Justification</i> | 163 |
| 3 LE MODELE DE SIMULATION | 165 |
| 3.1 LE PROCESSUS DE MODELISATION OBJETS | 165 |
| 3.2 LES « ENTITES DE TRANSACTION » ET LES « MOYENS DE PRODUCTION » | 167 |
| 3.3 LES « CENTRES D'ACTIVITES » | 171 |
| 3.3.1 <i>L'analyse Statique</i> | 172 |
| 3.3.2 <i>Le Modèle Dynamique</i> | 173 |
| 3.3.2.1 <i>Scénarios pour les « Centres d'Activités »</i> | 174 |
| 3.3.2.2 <i>Les Diagrammes d'Etats</i> | 175 |
| 3.3.2.3 <i>Un Diagramme Temporel</i> | 176 |
| 4 LA SOCIETE D'AGENTS COGNITIFS | 177 |
| 4.1 LE MODELE STATIQUE | 177 |
| 4.1.1 <i>Les Classes « Organisation »</i> | 177 |
| 4.1.2 <i>La Classe Générique « Agent Cognitif »</i> | 179 |
| 4.1.3 <i>Représentation de la Connaissance de l'Agent</i> | 181 |
| 4.1.4 <i>Les Messages et Décisions</i> | 183 |
| 4.2 LES MECANISMES DE FONCTIONNEMENT D'UN AGENT | 185 |
| 4.2.1 <i>L'unité de Contrôle</i> | 187 |
| 4.2.2 <i>Le module de Communication</i> | 189 |
| 4.2.3 <i>Le module de Perception</i> | 190 |
| 4.2.4 <i>Le module de Raisonnement</i> | 192 |
| 4.3 LE MODELE DYNAMIQUE | 192 |
| 4.3.1 <i>Définition de scénarios</i> | 192 |
| 4.3.2 <i>Diagrammes d'Etat</i> | 193 |
| 4.4 LE META-AGENT : « EFFET DE GROUPE » | 194 |
| 5 CONCLUSION | 195 |

CHAPITRE VI

Exploitation et validation

| | |
|---|------------|
| 1 INTRODUCTION | 197 |
| 2 « LE JEU DES ALLUMETTES » | 198 |
| 2.1 PRESENTATION DU « JEU DES ALLUMETTES » | 198 |
| 2.1.1 Principe de l'Exemple | 198 |
| 2.1.2 Hypothèses de Modélisation | 198 |
| 2.1.3 Scénarios Productiques Envisagés | 199 |
| 2.2 LE MODELE DE COMPREHENSION « META² » | 200 |
| 2.2.1 Modélisation sous Forme de Processus | 200 |
| 2.2.2 Les composants du Système | 200 |
| 2.2.3 Le Modèle de Compréhension du « Jeu des Allumettes » | 201 |
| 2.3 LE MODELE DE REPRESENTATION A BASE D'AGENTS | 203 |
| 2.3.1 L'Organisation des Agents | 203 |
| 2.3.2 Architecture des Agents | 204 |
| 2.4 LE MODELE DE SIMULATION | 209 |
| 2.4.1 Les « Entités de Transactions » et les « Moyens de Production » | 209 |
| 2.4.2 Les « Centres d'Activités » | 209 |
| 2.4.3 Les « Agents Cognitifs » | 211 |
| 2.4.4 Fonctionnement Global du Modèle de Simulation | 214 |
| 2.5 EXPLOITATION ET RESULTATS | 215 |
| 2.6 CONCLUSION | 217 |
| 3 UN EXEMPLE INDUSTRIEL | 218 |
| 3.1 PRESENTATION DE L'ENTREPRISE | 218 |
| 3.1.1 L'entreprise « PMI » | 218 |
| 3.1.2 Le Contexte Industriel | 219 |
| 3.1.3 Scénarios Productiques Étudiés | 220 |
| 3.2 LE MODELE DE COMPREHENSION | 221 |
| 3.2.1 Modélisation sous forme de Processus | 221 |
| 3.2.2 Les Composants du Système | 222 |
| 3.3 LE MODELE DE REPRESENTATION A BASE D'AGENTS | 223 |
| 3.3.1 Organisation des Agents | 224 |
| 3.3.2 Architecture des Agents | 224 |
| 3.3.2.1 Le processus stratégique | 224 |
| 3.3.2.2 Le processus opérationnel de traitement administratif | 225 |
| 3.3.2.3 Le processus opérationnel de transformation physique | 227 |
| 3.4 LE MODELE DE SIMULATION | 230 |
| 3.4.1 Les « Entités de Transactions » et les « Moyens de Production » | 230 |
| 3.4.2 Les « Centres d'Activités » | 231 |
| 3.4.3 « Les Agents Cognitifs » | 233 |

| | |
|---|----------------|
| 3.5 EXPLOITATION DU MODELE | 236 |
| 3.5.1 <i>Environnement de Simulation</i> | 236 |
| 3.5.1.1 Conditions Expérimentales | 236 |
| 3.5.1.2 Indicateurs de Performances | 237 |
| 3.5.2 « <i>Négociation en Fonction des Tailles de Lots</i> » | 238 |
| 3.5.3 Scénario 1 : « <i>Flux Poussé</i> » | 240 |
| 3.5.4 Scénario 2 : « <i>Autonomie</i> » | 240 |
| 3.5.5 Scénario 3 : « <i>Flux Tiré</i> » | 242 |
| 3.6 CONCLUSION | 243 |
| CONCLUSION GENERALE | 245 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 251 |
| ANNEXE A : LES METHODES DE GESTION DE PRODUCTION | 263 |
| ANNEXE B : SIM_PP : UN LANGAGE DE SIMULATION OBJET | 271 |
| ANNEXE C : RESULTATS DETAILLES DES SIMULATIONS | 277 |

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'analyse des conditions d'évolution des systèmes de production et de leur contexte a fait émerger la notion de « *réactivité* » pour caractériser un environnement de moins en moins stable et prévisible, dans lequel l'organisation doit chercher des alternatives à un fonctionnement planifié, prédictif, stable, figé et séquentiel.

Ces alternatives passent par une nouvelle vision de l'entreprise manufacturière considérée non plus comme une organisation monolithique où peu de place est laissée à l'autonomie et peu d'importance est accordée aux interactions entre les différents acteurs, mais comme un ensemble de systèmes de prise de décision, de traitements et de communications. Au delà du processus de transformation et de la mobilisation des ressources, l'entreprise sera considérée comme le siège de comportements humains. Ces comportements incluent des phénomènes d'exécution simple, de motivation, et de prise de décisions basées sur des rationalités et des intentions.

Ce nouveau paradigme, qui place l'entreprise dans une dynamique d'évolution permanente centrée autour des processus décisionnels, appelle un profond renouvellement des méthodes d'analyse, de compréhension et d'évaluation de l'entreprise en tant qu'organisation productive réactive. Pour être à même de prendre en compte la nature complexe de ce type d'organisation et les difficultés liées à la prise de décision, l'élaboration de telles méthodes devra procéder de démarches transdisciplinaires en s'appuyant sur les travaux de recherche développés dans les domaines de la gestion, de l'organisation, des sciences cognitives et de l'informatique.

Ainsi, la simulation à événements discrets qui jusqu'à présent a surtout été utilisée dans des approches statiques de dimensionnement, apparaît comme l'une des composantes majeures et fédératrices de ces nouvelles méthodes. En effet, elle peut servir de base à une nouvelle technique d'évaluation de la dynamique organisationnelle, voire être à l'origine de mécanismes d'apprentissage. Cette perspective suppose que l'on puisse construire des modèles intégrant des concepts nouveaux issus par exemple des recherches récentes en intelligence artificielle comme les systèmes multi-agents, a priori bien adaptés à la représentation des caractéristiques des organisations productives. La construction d'une société d'agents associée à la modélisation du système physique devrait permettre d'ajouter une dimension cognitive à la représentation de l'organisation que l'on veut simuler.

Motivations et Objectifs

Les travaux de recherche présentés dans cette étude s'appliquent à montrer que l'approche multi-agents permet de définir un nouveau type de modèle de simulation qui, par son niveau d'abstraction et ses fondements théoriques, est approprié à l'observation de la dynamique d'organisations sociales complexes, et à l'étude des changements organisationnels qui s'y produisent. Les lignes directrices de cette thèse sont donc :

- identifier, à l'issue d'une analyse de travaux se rapportant au contexte économique et industriel, la meilleure manière de représenter les organisations productives d'aujourd'hui.
- analyser les fondements théoriques associés à la représentation des connaissances et à la prise de décision distribuée, afin de modéliser les processus décisionnels de ces organisations.
- définir une méthodologie qui permette de concevoir un modèle de simulation qui reproduise au mieux les comportements et la réalité des organisations productives, et ceci afin de les étudier dans leur dynamique et leurs évolutions.
- valider l'intérêt de ce modèle par la construction d'une maquette informatique. L'application de cette maquette donnant l'illustration d'une prise en compte de la réalité des entreprises du

point de vue de la structure organisationnelle, de la distribution des décisions, des connaissances, rationalités, et motivations des acteurs, ...

Organisation des Travaux

Cette thèse comprend six chapitres où sont abordés chacun de ces objectifs, ces chapitres correspondent respectivement à des phases de réflexion, de conception et d'implémentation.

La première partie, composée des chapitres I et II, présente une réflexion sur la problématique des organisations productives en terme d'organisation et de méthodes de prise de décision. Il en ressort que les entreprises d'aujourd'hui doivent se développer en termes d'intégration et de flexibilité support du concept de « réactivité ». Une des clefs de cette réactivité vient d'une nouvelle vision de l'entreprise dans laquelle l'autonomie des acteurs est plus grande, ce qui se traduit par une distribution de la prise de décision aux différents niveaux de l'organisation.

Une manière d'aborder la complexité de ces organisations est d'utiliser des concepts systémiques pour en représenter les différents sous-systèmes. Cette vision globale de l'entreprise permettra de construire un modèle de compréhension (conceptuel) issu de la théorie générale des systèmes et de notions de méta-système.

Sur la base de cette problématique, la deuxième partie, développée dans les chapitres III et IV, va consister à étudier les concepts informatiques qui vont permettre de modéliser cette organisation « dynamique » et « distribuée ». Ces deux caractéristiques nous amènent à la construction d'un modèle de représentation dans lequel les modules de prises de décision sont fondés sur les notions d'autonomie et de coopération.

Le chapitre III présente l'un des fondements théoriques de notre réflexion : l'Intelligence Artificielle Distribuée, et plus particulièrement les Systèmes Multi-Agents. Ces systèmes permettent de concevoir des sociétés d'agents autonomes et interdépendants dans lesquelles la prise de décision est distribuée.

Le chapitre IV définit un modèle de représentation, issu de ces concepts théoriques, qui permet de représenter une organisation productive dans laquelle les agents cognitifs vont piloter et gérer l'ensemble du système en se basant sur un raisonnement issu de rationalités, d'intentions et d'un ensemble de connaissances sur l'entreprise.

La dernière partie, composée des chapitres V et VI, présente d'abord les outils informatiques qui ont permis la construction d'un modèle de simulation implémentant les différents concepts définis dans les parties précédentes. Elle développe ensuite la validation globale, à partir d'exemples, des différentes techniques associées à la problématique et aux évolutions induites par les changements organisationnels et par les degrés d'autonomie accordés aux acteurs de l'entreprise.

La démarche proposée peut être résumée dans la figure suivante :

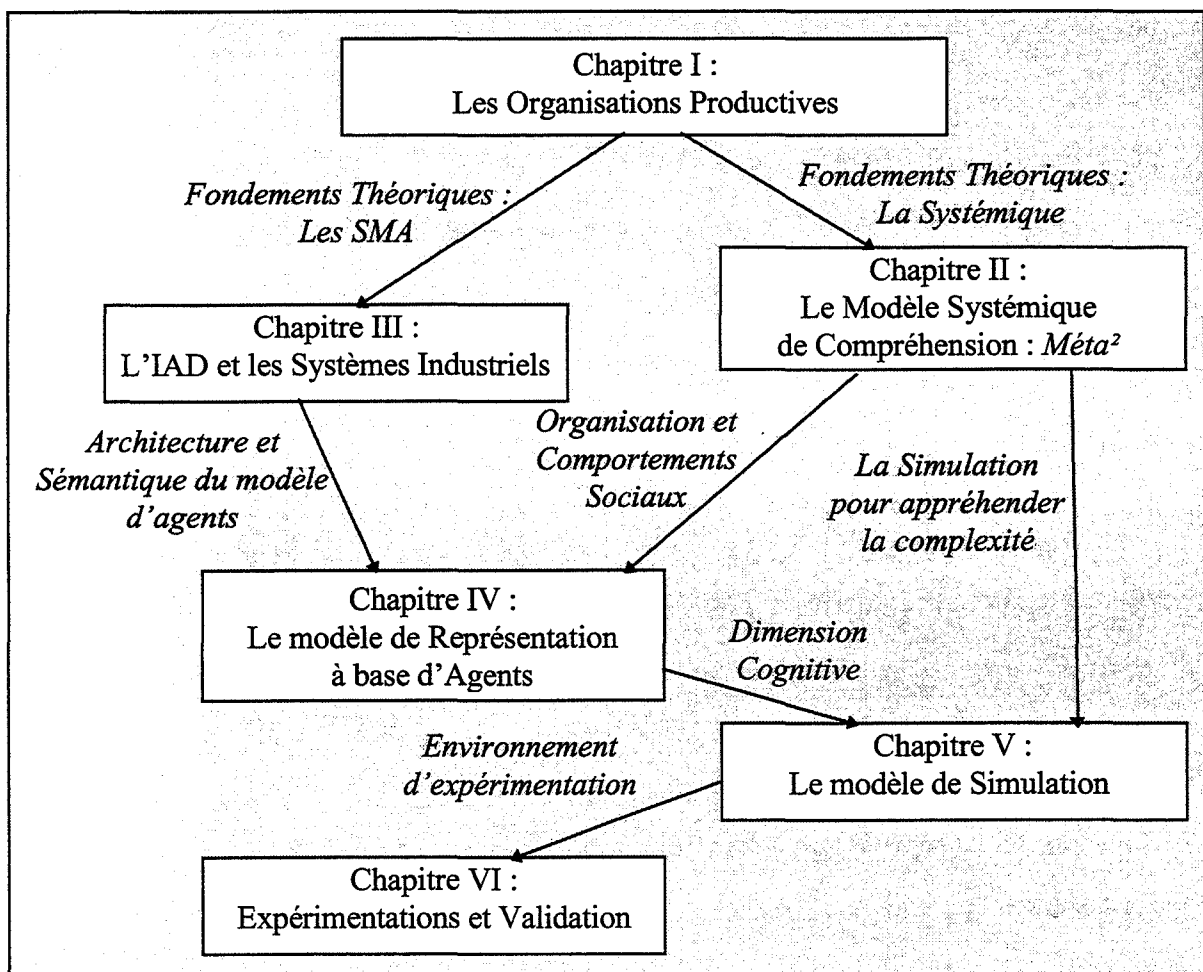


Figure 1 : « Organisation des Travaux »

CHAPITRE I

LES ORGANISATIONS PRODUCTIVES

L'objectif de ce chapitre est, tout d'abord, d'introduire les organisations productives, et établir leur nature complexe, avant de décrire les évolutions nécessaires en fonction du contexte industriel. Ces évolutions passent par un rapprochement entre la structure décisionnelle et la structure physique, et nécessitent une redistribution de la décision et une plus grande autonomie des acteurs décisionnels.

CHAPITRE I

1 INTRODUCTION

Les travaux que nous allons présenter sont axés sur la nécessité de changements organisationnels dans les entreprises actuelles. En effet, l'analyse des conditions d'évolution des systèmes de production et de leur contexte [Cohendet et Llerena 90] a permis de mettre en relief le principe de « *réactivité* » pour caractériser un environnement de moins en moins stable et prévisible, dans lequel l'organisation doit chercher des alternatives à un fonctionnement planifié, prédictif, stable, figé et séquentiel.

En effet, dans un nombre grandissant de secteurs, la production industrielle de masse est quasiment révolue : les marchés requièrent des délais de livraison de plus en plus courts et une plus grande diversité, les commandes se réduisent en nombre d'unités mais augmentent en fréquence, la qualité devient un impératif [Mulkens, 93].

L'entreprise doit donc évoluer d'une :

- Ancienne forme de compétition caractérisée par la capacité à fabriquer des produits en grande quantité, avec des enjeux centrés sur l'organisation de la fabrication,

Vers une

- Nouvelle forme de compétition caractérisée par la capacité à mettre sur le marché des produits nouveaux (réduction des cycles de vie), qui répondent à de nouvelles attentes (qualité, fiabilité, diversité,...) et qui soient à des prix compétitifs par rapport à la concurrence. Les enjeux de ce nouvel environnement sont : la réactivité, c'est-à-dire le développement de la flexibilité et de l'intégration des fonctionnalités de l'organisation.

Quelques constats émergent nettement pour illustrer cette évolution :

- les contraintes de délais,
- les difficultés réelles à appréhender un environnement (marché, concurrence, technologie)

plus que jamais source d'opportunités mais aussi de vulnérabilité,

- les risques en terme d'immobilisation de ressources productives et de capacités financières inhérents à une anticipation abusive,
- les incertitudes et les aléas engendrés par la complexité des dispositifs de reconfiguration rapide des ressources de production.

A partir de ces principes, nous allons tenter tout au long de cette thèse, d'étudier les effets de cette évolution en termes de changements organisationnels. Pour cela, il nous semble fondamental de ne pas rechercher une modélisation rigide et définitive des organisations productives, susceptible de convenir à un nombre forcément limité de cas, mais au contraire, de concevoir une structure adaptable, flexible et donc « *réactive* », c'est-à-dire un modèle d'organisation qui correspond à un système ouvert et sans a priori, et qui privilégie de manière explicite les flux décisionnels.

Cela va nous conduire à définir un processus de modélisation dont les principales bases de développement sont issues de la problématique industrielle (fig.I.1). Nous retenons deux axes forts qui seront développés au fur et à mesure de l'évolution dans la démarche méthodologique :

❶ La « Complexité » intrinsèque des systèmes de production : Pour tenter d'appréhender cette complexité, nous verrons que nous nous sommes basés sur deux points de vue importants de la modélisation : un point de vue « *Système* » en ce qui concerne la représentation et la compréhension des organisations à étudier, et un point de vue « *Simulation* » pour l'étude comportementale de l'évolution des organisations et la validation des stratégies organisationnelles.

❷ La « Prise de Décision » : tout changement organisationnel entraîne une redéfinition des responsabilités et des fonctionnalités des acteurs concernés. Pour que ces changements soient opérationnels et efficaces il faut passer d'une hiérarchie directive à une organisation en niveaux d'intégration [Burlat, 96], ce qui engendre une implication plus forte des différents acteurs de l'entreprise, et donc une plus grande autonomie.

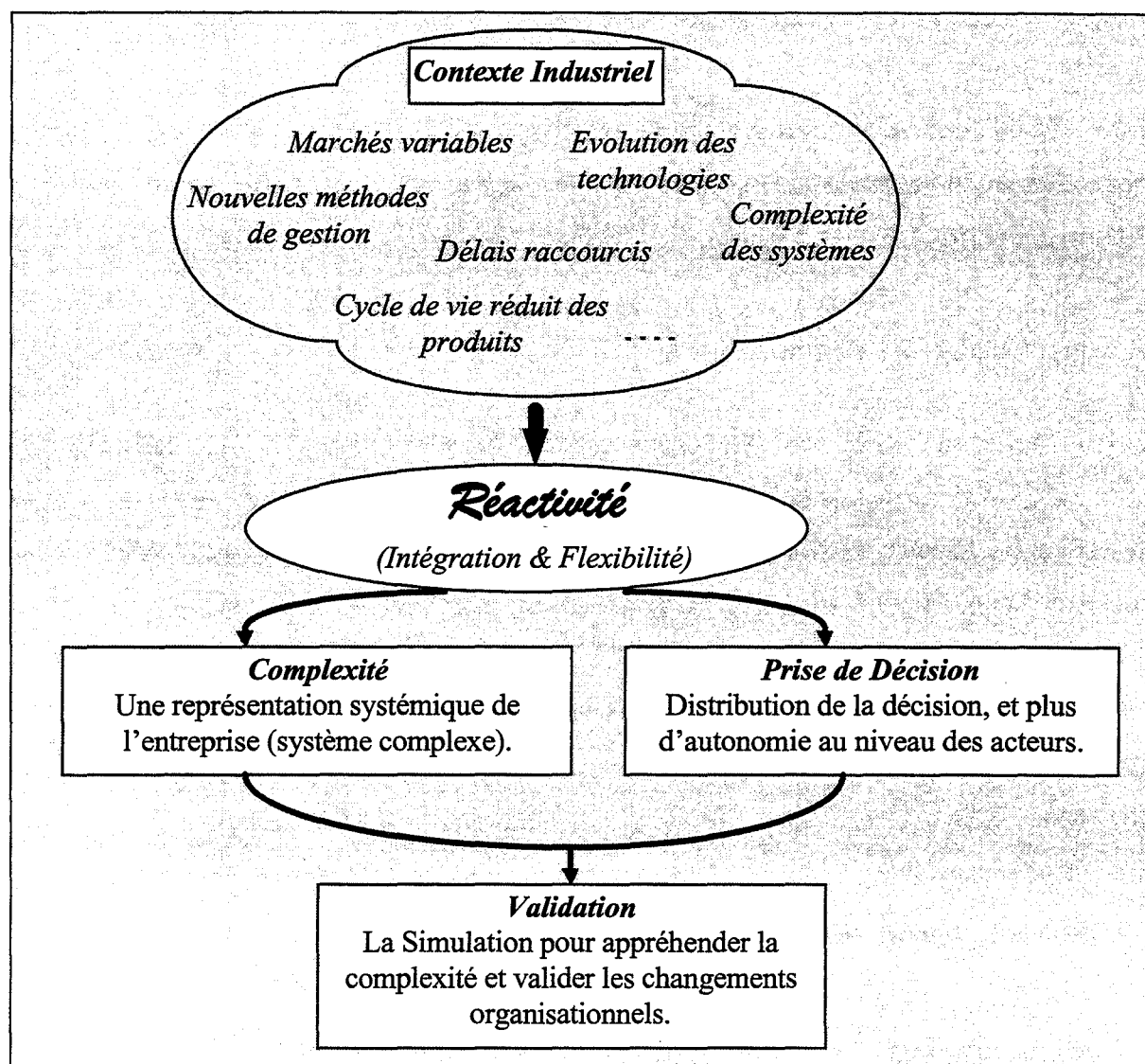


Figure I.1 « La Démarche d'Etude de la Problématique Industrielle »

Notre réflexion sur ce sujet s'est nourrie des recherches menées au sein de l'équipe « Etude et Modélisation des Systèmes Industriels », qui ont donné lieu à une thèse en « économie de la production » par P. Burlat [Burlat, 96]. Cette dernière décrit dans le détail et spécifie les notions introduites dans ce chapitre par rapport au contexte économique. Nous allons reprendre et analyser les points importants de ces travaux et les replacer, tout au long de notre étude, dans un contexte de modélisation d'entreprises.

Dans ce chapitre I, nous allons tout d'abord définir les organisations productives et leur principaux modèles décisionnels, avant de présenter les évolutions souhaitées par rapport au contexte industriel.

2 LES ORGANISATIONS PRODUCTIVES

Nous allons, dans cette première partie, introduire ce que l'on entend par organisation productive, et délimiter ainsi le champ de l'étude ; puis nous définirons l'un des aspects de la problématique (fig. I.1) : la complexité des systèmes productifs.

2.1 Description des organisations

De nombreuses définitions sont disponibles pour décrire et spécifier le concept de *production* et de *système de production*. Celle qui se rapproche le plus de nos considérations, et qui permet de se focaliser d'avantage sur les systèmes manufacturiers, est celle proposée par V. Giard [Giard, 88] : « *La production est une transformation de ressources appartenant à un système productif et conduisant à la création de biens et de services. Les ressources mobilisées à cette fin peuvent être de quatre types : des équipements (bâtiments, machines,...), des hommes (opérateurs intervenant directement dans le processus de transformation ou contribuant d'une manière ou d'une autre à son bon déroulement), des matières (matières premières, composants, ...) et des informations techniques ou procédurales (gammes, nomenclatures, consignes, procédures,...) ou relatives à l'état du système productif...* »

L'intérêt de cette définition est qu'elle précise le concept de système productif en tant que système mobilisant un ensemble de ressources. Mais, pour la compléter, il faut s'intéresser également aux fonctions périphériques de la fabrication (conception, gestion, marketing,...), et aux services administratifs en général, qui sont des parties intégrantes de la production.

La mobilisation nécessaire des ressources au sens de V. Giard, puis la prise en compte des fonctions périphériques fortement impliquées nous amènent à considérer un domaine plus étendu que le seul système productif. En effet, le concept d'organisation humaine, au sens de société d'acteurs travaillant ensemble et guidés par des objectifs collectifs, devra y être présent.

Cette dimension humaine a été étudiée par les théoriciens des comportements, ou « behavioristes », comme H. Simon, R. Cyert ou J. March [Cyert et al. 70] qui considèrent l'entreprise comme une coalition d'individus ou de groupes qui développent chacun leurs

propres aspirations. A titre d'exemple, l'analyse des organisations humaines par J. March et H. Simon [March et Simon, 74] a permis de discerner trois grandes catégories de comportements:

- Les membres de l'organisation sont des instruments passifs capables d'assumer un travail et de recevoir des directives, mais qui ne sont pas susceptibles de faire preuve d'initiative ou d'exercer une influence importante.
- Les personnes viennent dans les organisations avec leurs propres attitudes, leur propre système de valeur, leurs propres objectifs. Elles doivent donc être motivées ou stimulées pour adopter un comportement de participation au sein de l'organisation, sachant que les objectifs individuels et ceux des organisations ne sont pas toujours cohérents.
- Les membres d'une organisation ont pour tâche de prendre des décisions et de résoudre des problèmes. La perception de ces problèmes et le processus de pensée expliquent alors le comportement.

Ces catégories de comportements sont nécessairement présentes au sein des entreprises. Pour cela, nous avons préféré à la notion de « *système productif* » le concept d'« *organisation productive* ».

2.2 Complexité des Organisations Productives

Ces organisations productives doivent faire face, dans le contexte industriel actuel, à des demandes de plus en plus exigeantes en terme de délais, et les comportements des clients nécessitent souvent une quasi-personnalisation des produits. Pour garantir la satisfaction de ces exigences, il faut pouvoir identifier puis maîtriser les mécanismes complexes de gestion des flux matières et d'informations, et les décisions qui en résultent.

Or, les organisations productives englobent un ensemble d'aspects sociaux et économiques qui expliquent leur gestion complexe en univers incertain : « *L'entreprise ... dans une certaine mesure « concentre » la complexité par le fait qu'elle se trouve au carrefour de*

l'économique, du technique et du social. Chacun de ces domaines, déjà complexe en soi, se tisse aux deux autres dans des combinaisons mouvantes extrêmement difficiles à appréhender » [Genelot, 92]. De même, pour J.P. van Gigch [van Gigch, 87] « *la complexité au sein des entreprises est le résultat de la multiplicité et de l'enchevêtrement des interactions humaines dans une organisation* ».

2.2.1 La Complexité et l'Incertitude dans les Systèmes

De nombreux travaux [Woodward, 65] [Kieffer, 86] illustrent le fait que la complexité d'un système se caractérise par le degré de complexité des produits, leur diversité, et le nombre de transformations dans le processus. Baranger [Baranger, 87], quant à lui, détermine trois facteurs de complexité dans les systèmes de production :

❶ La diversification

Elle complique, d'une manière générale, le système de gestion et plus particulièrement la gestion de production. Même s'il existe « une base technologique commune », les modes de lancement, de gestion des stocks, et d'ordonnancement peuvent être différents, de même que la politique en matière de produits et de délais.

❷ La composante géographique

La diversité et l'éloignement des marchés des produits finis et des facteurs de production posent la question de la localisation des unités, des approvisionnements et des transports.

❸ Les facteurs organisationnels

Ils tiennent au comportement des personnes, aux relations qui s'établissent entre elles et avec l'organisation, aux valeurs retenues, à la nature et au caractère plus ou moins formalisé de la structure adoptée, etc.

Nous allons nous intéresser principalement à ces facteurs organisationnels en nous appuyant sur l'approche sociologique des organisations réalisée par J. March et H. Simon [March et Simon, 74] qui montre que dans les comportements de groupes apparaissent en fait un certain

nombre de phénomènes imprévisibles et inattendus. Ainsi dans une organisation productive, constituée par un ensemble d'individus, des phénomènes comportementaux vont prendre naissance. On peut citer à titre d'exemples [Lebel, 77] :

- la stabilisation et le maintien naturel dans une situation acceptable, les acteurs se satisfaisant facilement d'une situation stable dans laquelle ils se sentent relativement protégés.
- des comportements anti-intuitifs liés à la nature humaine en société,
- la nécessité d'utiliser des modes de commandes indirects, par exemple des effets de motivations (primes, congés, ...), qui permettent de sensibiliser et de motiver les individus,...

Ces différents phénomènes vont s'opposer aux schémas classiques des organisations (hiérarchie directive), et pousser à une analyse approfondie des comportements et des mécanismes d'orientation de la prise de décision.

2.2.2 Evolution et Complexification des Systèmes

De plus, le développement de la complexité au sein des entreprises se traduit également par une crise de l'organisation, en effet selon Genelot [Genelot, 92] : « *L'entreprise n'échappe pas à cette évolution par complexification et plusieurs facteurs contribuent même à l'accélérer ... Les responsables doivent renouveler leurs façons traditionnelles d'aborder les problèmes et trouver des moyens pour penser la complexité.* ».

La succession des méthodes d'organisation qui ont assailli les organisations depuis une décennie : ateliers flexibles, groupes semi-autonomes, organisation cellulaire, cercles de toutes natures (de progrès, de qualité, d'échange,...), qualité totale, juste-à-temps,... montrent bien qu'il n'y a pas de réponse unique à la maîtrise de la complexité [Beranger, 87]. En effet, aucune de ces méthodes n'est bonne ou mauvaise en soi, mais l'organisation est devenue l'art d'ajuster ces méthodes à des situations souvent confuses et instables, l'art de l'essai-erreur, l'art de la combinaison des diversités. L'efficacité est donc synonyme d'une vision stratégique claire, combinée à une grande vitesse de réaction, pour mettre ces méthodes en adéquation avec la réalité concrète dans le sens d'une performance permanente.

Pour résumer cette partie, nous pouvons dire qu'à notre sens, une organisation productive comporte un processus de transformation que nous centrons sur l'activité manufacturière, des ressources mobilisées et une organisation qui sera le siège de comportements humains.

Nous verrons dans les chapitres suivants que la complexité des processus de transformation, la nature des comportements humains, et l'évolution des méthodes organisationnelles nécessitent une approche globale et systémique en terme de modélisation, et requièrent des techniques de simulation pour appréhender les phénomènes complexes et étudier les changements organisationnels.

3 MODELES DE DECISION

Pour mieux situer les différents problèmes rencontrés en gestion des organisations il est important de décrire les principaux modèles de décision. Cette présentation permettra d'introduire le deuxième point à approfondir dans la problématique (fig. I.1), qui concerne la prise de décision dans les organisations productives.

3.1 Une Typologie des Décisions dans les Organisations

Pour aborder la prise de décision dans les entreprises, J.L. Le Moigne [Lemoigne, 90] se base sur une double approche de classification : par niveau et par méthode.

3.1.1 Les Classifications Décisionnelles

❶ *La classification par niveau* proposée par R.N. Antony [Antony et Dearden, 76], et détaillée par Ansoff [Ansoff, 89] s'inspire de la structuration hiérarchique des entreprises, et décompose les décisions selon un sens décroissant d'importance. Cette classification prend en compte l'horizon des décisions en distinguant les décisions à court, moyen et long terme :

✧ *Les décisions stratégiques* qui concernent la politique générale de l'entreprise à long terme (horizon de plus de deux ans, en général). A partir de l'analyse de la tendance du marché, de la

prévision de l'évolution des technologies et de l'analyse de la concurrence, les décisions stratégiques cherchent à faire évoluer l'ensemble des produits et à ajuster le mode d'organisation et la capacité de la production aux besoins du marché. Les décisions stratégiques se traduisent par :

- des investissements en équipements, recrutement et formation du personnel,
- arrêt de fabrication de certains produits et lancement de nouveaux produits,
- adaptation à de nouveaux modes de production, par exemple au juste-à-temps, ...

↳ *Les décisions tactiques* qui correspondent à un ensemble de décisions à moyen terme (horizon variant entre 6 mois et 2 ans). Si la capacité de production a été fixée par le niveau supérieur (décisions stratégiques), un exemple de décision tactique peut être la définition d'un programme de production.

↳ *Les décisions opérationnelles* assurent la flexibilité quotidienne nécessaire pour faire face à la demande, dans le respect des décisions tactiques. Parmi ces décisions on peut citer l'ordonnancement des opérations sur les machines, l'affectation des opérateurs aux machines, la gestion des stocks, etc. Elles tiennent compte de tous les détails du fonctionnement du système de production en temps réel.

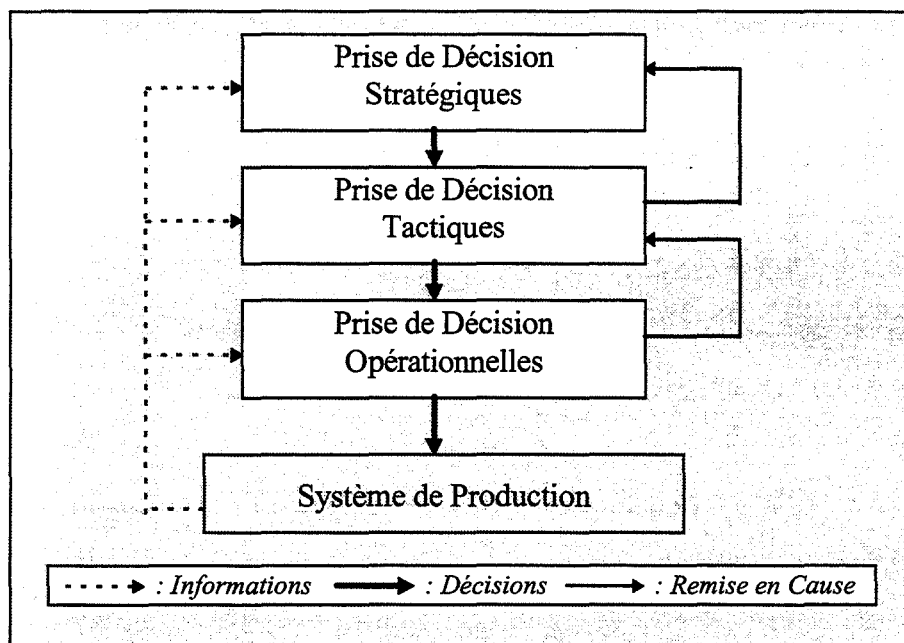


Figure I.2 « Classification des Décisions selon Ansoff »

Ces trois classes de décisions (fig. I.2) ne diffèrent pas seulement par l'horizon qui les caractérise de prime abord, deux éléments supplémentaires doivent être pris en compte : le niveau de compétence hiérarchique et celui d'agrégation de la décision. En effet, les décisions opérationnelles sont normalement prises par des agents d'exécution même si elles ont été préparées par des cadres. Les décisions tactiques sont en général du ressort des cadres et les décisions stratégiques relèvent de la direction de l'entreprise. Par niveau d'intégration de la décision il faut entendre niveau de détail des décisions prises quant aux productions à effectuer et aux moyens à mettre en oeuvre. En général, le niveau d'agrégation sera d'autant plus grand que l'horizon de la décision est éloigné.

Cette décomposition proposée par Ansoff [Ansoff, 89], illustre bien le lien direct entre niveau de décision et hiérarchie organisationnelle (organigramme).

❶ **La classification par méthodes** proposée par H.A. Simon en 1960 [Simon, 60], permet de classer les décisions en fonction des possibilités de les « programmer » aisément par des procédures de routines. Il distingue les décisions programmables des décisions non-programmables pouvant être structurées ou non :

❷ « *décision structurée* » : ces décisions correspondent au cas où, bien que l'information ne soit pas complète (non programmable), le décideur sait qu'il peut faire appel à un certain nombre d'algorithmes, de structures de raisonnement, qui seront susceptibles de l'aider grandement à avancer dans la phase de résolution. La plupart des modèles utilisés en simulation de gestion contribuent à jouer ce rôle structurant dans la technique de décision.

❸ « *décisions non structurées* » ou faiblement structurées pour lesquelles la multiplicité des critères à prendre en compte peut décourager la formalisation.

L'appel à la rationalité lors d'une prise de décision dépend ainsi de la situation informationnelle dans laquelle le décideur se trouve. Dans le cadre d'une hypothèse de rationalité absolue le décideur doit :

- au départ avoir connaissance de l'ensemble complet des possibilités de choix,

- savoir quelle série de conséquences s'attache à chaque possibilité de choix,
- avoir un ordre de préférence qui classe toutes les séries de conséquences,
- sélectionner sa décision en fonction de l'ensemble de conséquences qu'il préfère.

Dans la plupart des cas, le choix s'effectue dans un contexte d'information incomplète ; le décideur n'a pas la connaissance totale des possibilités de choix. De plus, les conséquences attachées à chaque possibilité de choix ne sont pas toujours certaines. Aussi, pour J. March et H. Simon [March et Simon, 74], le choix est toujours exercé au regard d'un schéma simplifié, limité et approximatif de la situation réelle.

En effet, dans la réalité, « la plupart des prises de décisions humaines, individuelles ou organisationnelles se rapportent à la découverte et à la sélection de choix satisfaisants ». Ce contexte de prise de décision est qualifié de rationalité limitée ou procédurale, par opposition à la rationalité absolue.

3.1.2 Typologies des Décisions en Production

D. Thiel [Thiel, 93] [Kieffer et Thiel, 92], s'inspirant d'une synthèse des classifications par niveau et par méthode proposée par G. Gory et M. Scott Morton [Gorry et Morton, 71], a illustré sur un exemple un ensemble de décisions appliquées dans les entreprises manufacturières (fig. I.3).

Le croisement des niveaux stratégique, tactique et opérationnel, avec les catégories programmée, structurée et non structurée donne ainsi neuf classes possibles de décisions. On retrouvera par exemple dans la classe « *opérationnelle programmable* » les opérations de suivi de la production ou les achats urgents, dans la classe « *tactique structurée* » les décisions de sous-traitance et dans la classe « *stratégique non structurée* » la motivation du personnel.

Les autres classes sont traditionnellement moins citées dans les modèles hiérarchisés d'organisations productives. En particulier, la classe « *opérationnelle non structurée* » qui correspond à des décisions d'exploitation courante, non formalisées en raison de la multiplicité

des critères à prendre en compte, et qui renvoie à une rationalité procédurale en situation d'autonomie, et la classe « *stratégique programmable* » car les décisions stratégiques sont complexes et englobent de nombreux paramètres qualitatifs qui ne peuvent être programmés à partir d'un simple algorithme. Nous verrons dans les chapitres suivants que ces deux classes de décisions peuvent être modélisées en utilisant des concepts d'intelligence artificielle distribuée.

Par contre, les décisions « *opérationnelles non-structurées* » assurant le fonctionnement de l'appareil productif ne sont pas d'une grande complexité, et doivent être prises rapidement avec des règles de décision simples pour assurer une continuité de l'exploitation industrielle.

| | Décisions OPERATIONNELLES | Décisions TACTIQUES | Décisions STRATEGIQUES |
|--------------------------------------|---|--|--|
| Décisions PROGRAMMABLES | <ul style="list-style-type: none"> - Modifier l'effectif à court terme - Suivre la production - Effectuer des achats urgents | <ul style="list-style-type: none"> - Mettre en oeuvre une maintenance préventive - Modifier politique de gestions des stocks - Analyser et contrôler les budgets | |
| Décisions STRUCTUREES | <ul style="list-style-type: none"> - planifier et ordonnancer les ordres de production | <i>Politique Industrielle</i> <ul style="list-style-type: none"> - Sous-traiter des opérations de production | <i>Stratégie Industrielle</i> <ul style="list-style-type: none"> - Spécialiser les usines par produits ou technologie - Localisation d'usines <i>Stratégie Informatique</i> <ul style="list-style-type: none"> - Automatiser les traitements |
| Décisions NON-STRUCTUREES | | <i>Politique « Sociale »</i> <ul style="list-style-type: none"> - Motiver le personnel - Mettre en oeuvre des horaires flexibles - Améliorer les collaborations <i>Politique Industrielle</i> <ul style="list-style-type: none"> - Réduire les niveaux de nomenclatures - Mettre en oeuvre une GPAO - Mettre en oeuvre le Kanban - Diversifier fournisseurs <i>Politique Financière</i> <ul style="list-style-type: none"> - Fixer niveau des stocks | <i>Stratégie « Sociale »</i> <ul style="list-style-type: none"> - Embaucher du personnel - Motiver le personnel <i>Stratégie Industrielle</i> <ul style="list-style-type: none"> - Concevoir des syst. de production - Investir, automatiser, robotiser |

« Figure I.3. Exemple de Typologie des Décisions en Production »

3.2 Méthodes et Outils d'Aide à la Décision

La complexité des systèmes de production rend difficiles les prises de décisions non-programmables tactique et stratégique, pour cela de nombreux outils et méthodes d'aide à la décision sont disponibles. Les plus couramment utilisés en production sont inventoriés, par Thiel [Thiel, 93], de manière non exhaustive et classés d'après les mêmes critères de croisement par niveau et par méthode que ceux évoqués précédemment :

| | Décisions OPERATIONNELLES | Décisions TACTIQUES | Décisions STRATEGIQUES |
|--------------------------------------|--|--|---|
| Décisions PROGRAMMABLES | - Tables de décisions | - Outils statistiques | |
| Décisions STRUCTUREES | - Méthode MRP - Algo. d'ordonnancement - Réseaux de Pétri - Grafcet | - Méthode MRP - Méthodes de recherche opérationnelle - SIAD - <i>Simulation</i> | - Méthodes de recherche opérationnelle - Méthodes multicritères - <i>Simulation</i> |
| Décisions NON-STRUCTUREES | | - <i>Simulation</i> | - Méthodologie d'analyse et de conception (merise, sadt, grai, AMS, ...) - Analyse des systèmes - <i>Simulation</i> |

Figure I.4 « Exemple d'Outils d'Aide à la Décision »

On retrouve dans ce tableau, un ensemble d'outils et de méthodes utilisé fréquemment dans l'industrie. Nous ne reviendrons pas, dans ce chapitre, sur les méthodes de gestion de production (détaillées en Annexe A) qui seront utilisées dans les chapitres suivants pour mettre en oeuvre les changements organisationnels, ni sur les outils et méthodes statistiques et mathématiques (algorithmes d'ordonnancement, méthodes multicritères, ...), dont l'efficacité est indéniable, et sur les méthodes d'analyse et de conception de systèmes.

L'intérêt pour nous est de faire apparaître, dans l'état actuel des connaissances, la difficulté d'utiliser des techniques précises permettant d'optimiser le processus de décision inhérent aux problèmes non programmables. Beaucoup de chercheurs se sont intéressés à l'organisation de la connaissance pour ce type de décision, on peut citer, à titre d'exemple, les approches déductive et systémique, l'approche explicitant le rôle de la logique, de l'intuition et de

l'expérience dans la prise de décision, les théories « behavioristes » et l'étude des mécanismes d'apprentissage fondée sur les résultats de la recherche cognitive.

Mais, à l'heure actuelle, la simulation semble être l'un des outils les plus intéressants pour appréhender ce type de situations [Ouzrout et al. 94a]. En effet, dans le domaine de la productique, la simulation, en tant que méthode d'observation de l'évolution du comportement des systèmes, représente un mécanisme d'évaluation qui permet la mesure rapide et précise des performances associées à un espace de décision déterminé. Ce mécanisme peut apporter une contribution significative dans le cadre du diagnostic de l'organisation et du choix des actions correctives à apporter.

L'un des problèmes majeurs qui reste à étudier est celui de l'analyse des mécanismes d'orientation de la prise de décision confrontée à des problèmes complexes et nouveaux (cf. I.2.2), cette ambition est celle des spécialistes de l'intelligence artificielle. Nous verrons dans les chapitres suivants que nous nous appuierons sur des techniques d'intelligence artificielle distribuée pour construire un modèle de simulation apte à étudier ce type de problèmes.

4 CONTEXTE INDUSTRIEL: EVOLUTION DES ORGANISATIONS

Comme nous l'avons vu en introduction, le contexte dans lequel évoluent les organisations productives s'est transformé. L'incertitude engendrée par ces transformations rend nécessaire une adaptation de l'organisation à travers des changements organisationnels. Changements qui doivent assimiler aussi bien les aspects organisation du travail, la composante décisionnelle et informationnelle, que le système physique dans son intégralité (flux physique, ressources, etc.).

4.1 L'Evolution Organisationnelle

A partir des années 60, un certain nombre d'entreprises ont développé une stratégie d'organisation basée sur la « réactivité », en privilégiant la réduction des délais de réponse de l'entreprise aux sollicitations extérieures. Ce besoin de réactivité est d'abord l'effet d'une concurrence qui s'établit sur les prix, la qualité, et sur les délais de livraison. Mais c'est

également une condition nécessaire pour profiter pleinement de l'évolution technologique en incorporant rapidement les progrès techniques dans les produits ou dans les processus de fabrication (l'entreprise qui saura intégrer rapidement les innovations possédera un avantage certain sur ses concurrentes).

Cette réactivité sera donc essentiellement la conséquence du niveau atteint par l'organisation en terme d'intégration et de flexibilité :

4.1.1 L'Intégration

Le concept d'intégration dans les organisations productives peut être défini comme étant relatif à la mise en place de connexions (liens informationnels ou physiques) entre des unités opérationnelles indépendantes. Avec pour objectif principal d'accélérer les flux de produits ou d'informations et améliorer ainsi la réactivité du système face aux perturbations extérieures.

M. Gibert [Gibert, 89] regroupe dans cette approche les aspects suivants :

- la circulation plus ou moins automatique des produits,
- la communication entre équipements et entre fonctions,
- la substitution de matériels informatiques à l'homme dans certaines activités de traitement de l'information, comme la prise de décision,
- l'établissement de liaisons plus étroites entre matériels,
- la coordination des opérations.

Selon une analyse plus fonctionnelle, J. Mélése [Mélése, 91] spécifie différentes formes d'intégration :

- *l'intégration informatique* qui caractérise un réseau cohérent de récupération et de distribution des informations dans l'ensemble du système,
- *l'intégration intra-fonction* qui signifie qu'il y a une chaîne et des liaisons logiques entre le recueil des données, leur contrôle, leur traitement, l'application de méthodes de gestion, l'émission d'ordres, et enfin le contrôle des réalisations,
- *l'intégration inter-fonction*, par exemple entre les prévisions, la programmation de la

production, la gestion des stocks et les approvisionnements,

- l'intégration *homme-machine* qui vise à améliorer la complémentarité des tâches confiées à l'homme et à la machine.

De l'intégration informatique à l'intégration homme-machine, l'aspect *coordination* apparaît comme un point central de ces processus organisationnels. Par exemple, la relation homme-machine peut se décomposer en trois actions de base : l'émission d'informations de l'opérateur vers la machine par l'action des manettes de commande, puis réception d'informations en provenance de la machine sur l'apparition d'incidents, et enfin l'interprétation de ces événements par l'opérateur qui transmettra de nouveaux ordres vers la machine.

Or dans le cadre d'un investissement en technologie, la machine sera par exemple remplacée par un centre à commande numérique, ce qui aura pour effet de déplacer le niveau d'application des trois actions de base précédentes : un programme remplacera la manipulation des manettes, le contrôle sera effectué par une procédure de correction automatique des dérives, et l'interprétation d'événements mènera à des corrections sur les programmes de pilotage et de contrôle.

Aussi, la coordination de la boucle commande-contrôle-interprétation de premier niveau devient entièrement prise en charge par la machine, l'homme intervenant sur une boucle du même type, mais de second niveau. De ce fait, l'introduction de technologies s'accompagne la plupart du temps de questions nouvelles autour de la gestion de production : comment l'entreprise peut-elle réorganiser sa production, c'est-à-dire, entre autres, développer une coordination de ses ressources, pour réaliser une production dans de bonnes conditions.

4.1.2 La Flexibilité

Un second axe de développement face à l'augmentation du risque et de l'incertitude, associé à l'évolution organisationnelle et environnementale, est la recherche de flexibilité : *« après une période d'expectative, les entreprises les plus performantes ont cherché à s'adapter aux conditions d'incertitude accrues dans leur relation avec un environnement instable. Le maître*

*mot de la période récente est logiquement devenu celui de la **flexibilité**, caractérisant l'aptitude des entreprises à s'adapter à un environnement incertain » [Durieux, 92].*

La **flexibilité** peut être vue sous un angle purement technologique (degré de flexibilité d'un équipement suivant le nombre de produits), ou sous un angle décisionnel (processus de pilotage et de décision qui coordonne l'écoulement du flux physique) [Okongwu, 90].

❶ **Flexibilité Technologique** : cette flexibilité peut être structurée selon la typologie de décision de Ansoff [Ansoff, 89] :

- La flexibilité stratégique mesurera la rapidité de l'entreprise à concevoir et fabriquer de nouveaux produits pour répondre aux modifications de la demande du marché.

- La flexibilité tactique, liée à la gestion des ressources correspondra notamment à la capacité d'intégrer de nouvelles technologies en terme d'équipements de production et à la capacité de modifier aisément des produits existants.

- La flexibilité opérationnelle fera référence aux possibilités d'effectuer des changements rapides dans les séries fabriquées, aussi bien en terme de volume de production qu'en terme de variété des produits.

Selon le niveau sur lequel une entreprise améliorera sa flexibilité, les décisions court terme, moyen terme ou long terme d'adaptation aux perturbations seront facilitées.

❷ **Flexibilité Décisionnelle** : P. Cohendet et P. Llerena [Cohendet et Llerena, 90] relient également décision et flexibilité, ce qui les mène à distinguer d'une part la flexibilité statique et d'autre part la flexibilité dynamique :

- la flexibilité statique est un mode de réponse de l'entreprise en avenir risqué, c'est-à-dire pour lequel les variables de l'environnement sont définies par des lois de probabilité connues. Elle peut correspondre au sein d'un système de production à la faculté d'offrir

simultanément plusieurs produits différents par utilisation d'équipements flexibles et sans pour autant les fabriquer tous continûment. P. Cohendet et P. Llerena [Cohendet et Llerena, 90] indiquent que : « *cette forme de flexibilité demeure en grande partie compatible avec le modèle taylorien-fordien puisqu'il s'agit d'une simple juxtaposition de processus, répondant chacun à l'ancienne logique de production* ».

- la flexibilité dynamique correspond à la capacité du système à répondre à des variations d'environnement imprévisibles donc non modélisables à l'avance. En ce sens, elle fait appel à des processus d'apprentissage au moment de l'apparition de l'événement, et relève donc de l'aptitude de l'organisation à s'adapter dynamiquement à des situations nouvelles.

Ce niveau de flexibilité dynamique peut être mesuré par le délai de réaction par rapport aux variations de l'environnement, et ces auteurs rejoignent ainsi la décomposition hiérarchique de la typologie de Ansoff. A court terme, ils évaluent le niveau de flexibilité par le délai de production des produits, qui mesure à un niveau opérationnel la capacité de réaction de l'organisation à la demande. A moyen et long terme, ils évaluent le niveau de flexibilité par le temps d'adaptation de l'organisation pour renouveler les produits et transformer son processus de production. Le caractère dynamique est constamment présent dans cette décomposition, en raison de l'imprévisibilité de l'environnement qui nécessite le recours à des phases d'apprentissage et d'utilisation de connaissance, plutôt que d'exécution de procédures définies à l'avance. Ce qui correspond à notre volonté d'utiliser des modèles de simulation basés sur des concepts cognitifs d'intelligence artificielle pour simuler ces évolutions.

4.2 Autonomie et Prise de Décision

Comme nous l'avons vu la réactivité est basée sur deux axes de développement privilégiés, l'intégration et la flexibilité, qui sont étroitement liés et correspondent à une évolution aussi bien en termes technologiques, qu'informationnels et décisionnels. Ces évolutions nécessitent de nouveaux modes de gestion de production, et pour que la réactivité soit efficace, il faut revoir la manière dont sont organisés les niveaux de prise de décision.

4.2.1 La Nécessité d'un Accroissement de l'Autonomie

« Promouvoir l'autonomie dans les modules de prise de décision ne suppose en aucun cas l'autonomie des modules vis-à-vis du système global. Bien au contraire, l'intégration telle que nous la concevons stigmatise l'interdépendance et la complémentarité des modules entre eux, dans le sens où le pilotage nécessite de pouvoir prendre des décisions en fonction de son environnement (transmission des ordres, des consignes, des informations d'état, de protection, de synchronisation), puis de transmettre à l'extérieur les informations que le système attend de lui (état de marche, messages de production, de contrôle, d'identification, de maintenance...) ». [Everaere et Mahieu, 91]

L'évolution permanente des organisations se construit par la combinaison de conduites programmées et de conduites autonomes. La méthode la plus couramment utilisée pour organiser l'action consiste à la découper en séquence d'actions élémentaires (programme) qui, correctement déroulées, conduisent normalement à l'objectif visé.

Cette façon de faire fonctionne très bien quand aucun incident ne survient au cours de l'action programmée, mais si des imprévus, des incertitudes, des oppositions déroutent ou stoppent le programme, le pilote de l'action se trouve désemparé. C'est à ce niveau que la capacité de réaction à l'imprévu prend toute son importance, si elle est faible l'évolution des événements sera livrée au hasard.

Cette capacité de réaction fait intervenir les notions de stratégie et d'autonomie. Si le décideur a une vision permanente des buts à atteindre, c'est-à-dire précisément une « stratégie », il pourra, dans des conditions incertaines ou aléatoires, conduire une action intelligente autonome pour transformer la situation.

L'autonomie est donc la capacité à réagir en inventant ses propres règles, et les conduites autonomes sont indispensables dans toutes les situations imprévues, où les directives données à l'avance deviennent inopérantes.

4.2.2 Autonomie et Distribution de la Décision

*« Le savoir utile à la performance est aussi un savoir **distribué**, un savoir dont plusieurs acteurs détiennent en propre des fragments et dont personne ne détient la totalité. Pour améliorer la performance rien n'est possible sans s'appuyer sur la part de vérité que détient chacun »* [Lorino, 91]

En décentralisant, en augmentant les degrés de liberté des individus, on les met en position favorable pour percevoir les signes annonciateurs de perturbations. En développant l'information de tous les acteurs, leur capacité à réagir aux sollicitations extérieures, la rapidité et la pertinence de leurs réflexes, c'est la capacité d'ensemble du système à faire face aux fluctuations déstabilisantes, ou au contraire à amplifier certains changements recherchés, que l'on décuple.

La décentralisation ne doit pas être le seul mode de gouvernement, au contraire, il convient là aussi de diversifier et combiner les méthodes. Comme dans un organisme humain, certaines fonctions de l'entreprise doivent être centralisées, d'autres décentralisées, et d'autres encore doivent être centralisées autour de pôles eux-mêmes décentralisés. C'est dans une combinaison de « centrisme, d'a-centrisme et de poly-centrisme » [Morin, 77] qu'on trouvera les réponses les mieux adaptées à la complexité.

L'essentiel ne tient pas tant à la structure que l'on donnera à ces différents pôles de responsabilités, qu'à la vie qu'on saura leur insuffler. Pour cela, nous utiliserons des concepts multi-agents qui permettent de concevoir des modèles de sociétés d'entités autonomes et distribuées pour la prise de décision.

5 CONCLUSION

Nous avons vu que les relations de l'entreprise avec son environnement sont caractérisées par l'instabilité et la variabilité. Nous avons montré que face à cette évolution, les organisations productives complexes devaient envisager une action sur l'ensemble de l'architecture organisationnelle, c'est-à-dire à la fois les sous-systèmes physique, informationnel et

décisionnel, pour être réactives et s'adapter ainsi aux évolutions du contexte industriel.

Cette réactivité doit se développer essentiellement dans le sens de la flexibilité et de l'intégration, deux axes qui ont tendance à rapprocher la structure décisionnelle de la structure physique auparavant plus distinctes, et relier ainsi plus fortement la gestion du flux avec le flux lui-même. Ce rapprochement nécessite une redistribution des niveaux de décision et une plus grande autonomie des acteurs décisionnels.

Nous allons à présent décrire les modifications technologiques, humaines et organisationnelles utilisées comme réponse à l'évolution de l'environnement, par le biais d'un processus de modélisation qui va nous permettre d'aboutir à un modèle de simulation. Ce processus va débuter dans le chapitre suivant par la construction d'un modèle conceptuel de compréhension des organisations.

CHAPITRE II


LE MODELE SYSTEMIQUE DE COMPREHENSION : « META² »

Après une introduction aux nouvelles approches de gestion (la gestion par les activités) et à l'analyse systémique, nous tenterons de montrer que la simulation est une méthode intéressante pour appréhender la complexité des organisations productives et comme outils de validation de modèles productiques.

Puis nous décrirons le modèle de compréhension Méta², issu d'une méthodologie systémique l'AMS, qui intègre dans sa représentation des structures décisionnelles des mécanismes d'orientation de la prise de décision.

CHAPITRE II

1 INTRODUCTION

 a présentation des organisations productives effectuée dans le chapitre précédent a permis de faire apparaître la nécessité de développer les axes privilégiés que sont la flexibilité et l'intégration pour favoriser le processus de réactivité de l'entreprise face au contexte économique.

Ce développement passe par un rapprochement entre la structure décisionnelle et le flux physique pour que l'organisation puisse répondre efficacement aux sollicitations de l'environnement. Cela revient à évoluer d'une vision monolithique et centralisée de la décision et de l'information à une vision répartie et distribuée qui entraîne un accroissement de l'autonomie des centres de décision.

Cet accroissement de l'autonomie provient non seulement du besoin d'amélioration de la réactivité des systèmes, mais également, et dans un sens de flexibilité dynamique, de la nécessité d'une mobilisation collective des acteurs décisionnels [Burlat, 96]. Nous verrons sur le modèle de compréhension que cette évolution passe par une représentation plus explicite de la structure de décision.

Nous allons donc, pour aboutir à un modèle comportemental d'entreprise, entamer dans ce chapitre un processus de modélisation qui va débiter par la construction d'un modèle conceptuel d'organisation que nous appellerons « *Modèle de Compréhension Méta²* ». Dans cette perspective, nous analyserons différentes méthodes de modélisation en productique, puis nous tenterons de définir un modèle qui réponde aux objectifs de réactivité, de distribution et d'autonomie spécifiés ci-dessus.

Pour cela, le modèle de compréhension devra se baser sur les principes suivants :

- la vision « *Processus* », selon Lorino [Lorino, 91], pour gérer et organiser des entreprises dites réactives.
- l'approche systémique pour appréhender la complexité des systèmes industriels, en terme de modélisation.
- la simulation : nécessaire pour étudier le comportement dynamique du modèle et valider l'efficacité des changements organisationnels. Le modèle de compréhension devra donc permettre le passage de manière relativement aisée à un modèle de simulation.

2 LES PRINCIPES DE BASE

Avant d'entamer la construction du modèle de compréhension, nous allons donc décrire et analyser une méthode qui permet d'organiser et de gérer des entreprises dites « réactives », puis nous aborderons les concepts définissant l'approche systémique, avant de conclure sur la « *simulation* », son intérêt, et la manière dont on peut construire et valider ce type de modèle.

2.1 La Gestion par les « Activités »

2.1.1 Le Concept d'Activité

La maîtrise des techniques du contrôle de gestion devient un élément essentiel de différenciation compétitive sur le marché international. Un élément clef de ce changement est la *gestion par les activités*, nouvelle philosophie du pilotage propre à renouveler le regard porté sur la performance et à reconstruire les techniques de gestion [Lorino, 95].

Cette nouvelle philosophie rejoint les techniques utilisées en « *Reengineering* », concept qui correspond à une nouvelle manière de modéliser l'entreprise, ou plus précisément à « *reconcevoir et mettre en oeuvre de nouvelles formes d'organisation pour l'entreprise* ».

Le reengineering propose de focaliser l'analyse et l'action sur les processus en oeuvre au sein des entreprises et à leur reconfiguration. Ces processus (traitement des commandes, développement de produits, logistique, production, ...) permettent de mettre en oeuvre des

structures organisationnelles transversales par rapport à l'organisation verticale et hiérarchique ; ce qui favorise l'échange d'informations et développe la coopération.

2.1.2 L'Organisation par « Processus »

Lorino [Lorino, 91] décrit une organisation en trois niveaux principaux : le niveau activité, le niveau processus opérationnel, et le niveau processus stratégique ou projet.

❶ Une *activité* (fig. II.1) est tout ce que l'on peut décrire par des verbes dans la vie de l'entreprise : tourner, fraiser, assembler, négocier un contrat, émettre des factures, etc. Elle correspond à un ensemble de tâches élémentaires (qui se positionnent dans le temps) :

- réalisées par un individu ou par un groupe,
- faisant appel à un savoir-faire spécifique,
- permettant de fournir un extrant (la pièce fraisée, le budget,...)
- à partir d'un panier d'intrants (travail, machine, informations,...).

Il peut donc s'agir d'activités technologiques liées à un processus de fabrication ou d'activités purement administratives, c'est-à-dire tout ce qui fait la substance de l'entreprise.

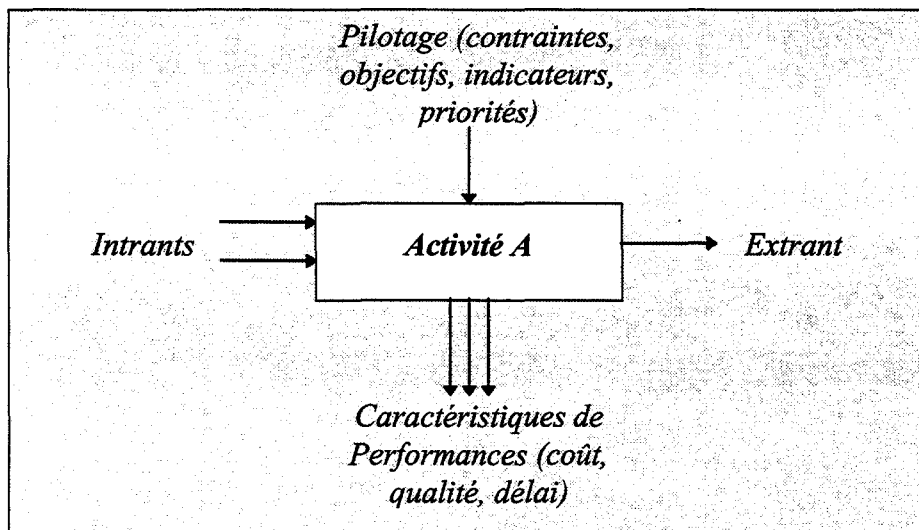


Figure II.1 « Une Activité de l'Entreprise »

Au regard de la nature de l'activité (type de savoir-faire auquel elle fait appel, logique de performance, objectifs poursuivis), quatre grandes catégories peuvent être distinguées : les activités de conception, de réalisation, de maintenance, et les activités dites discrétionnaires.

L'enchaînement d'activités (ou *chaîne d'activité*) qui constitue un processus s'inscrit dans le temps. Selon l'importance de cette durée, on se trouvera en présence de **processus opérationnels** (durée globale courte, exemple transformation matières) ou de **processus stratégiques** (durée globalement longue, exemple cycle de vie d'un produit) qui représentent des projets de l'entreprise.

❷ Les **processus opérationnels** (fig. II.2) constituent les ensembles d'activités ainsi finalisés par un objectif global (un extrant matériel ou informationnel global). Les processus sont donc des combinaisons de faire et de savoir-faire distincts.

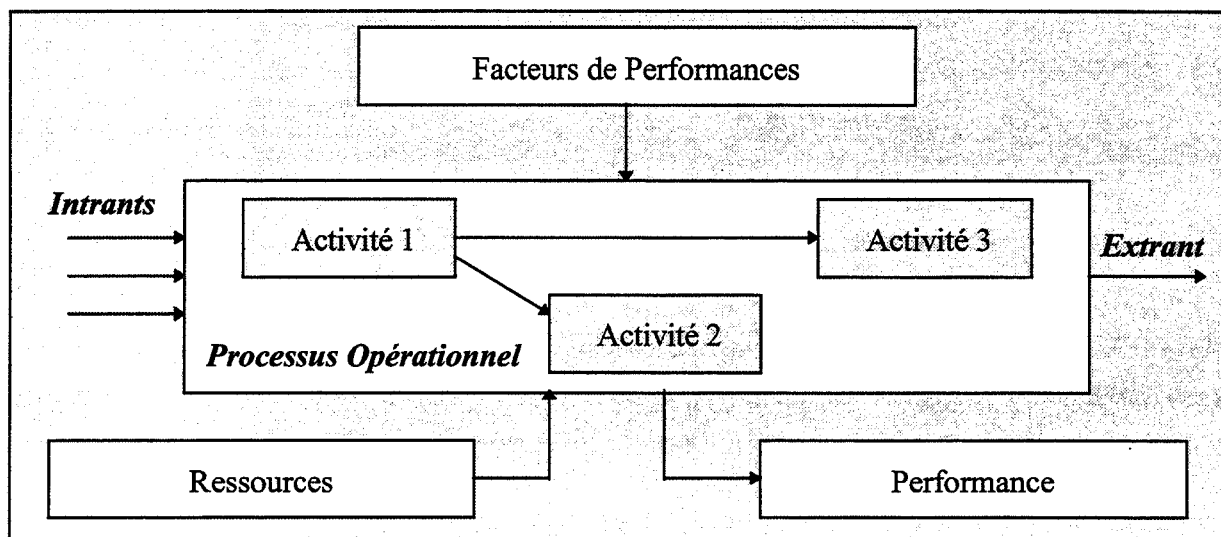


Figure II.2 « Un Processus Opérationnel »

S'il peut y avoir plus de cent activités dans l'entreprise, il n'y a guère plus d'une dizaine de processus opérationnels significatifs (transformation des matières, maintenance des ressources technologiques,...). Ils représentent le trait d'union entre les objectifs de l'entreprise et le déroulement concret des activités.

Ils ont trois caractéristiques importantes [Zarifian, 94] :

- ils sont généralement transversaux à l'organisation hiérarchique et aux divisions fonctionnelles de l'entreprise,
- chaque processus a un extrant global unique,
- il a également un client interne ou externe.

❸ A la différence des processus opérationnels, les *processus stratégiques* (fig. II.3) ne sont pas permanents : ils s'assimilent à des projets, mais des projets ayant pour « matière » les processus opérationnels eux mêmes. Les processus stratégiques sont lancés comme moments forts de remise en cause de l'existant, et correspondent à des décisions stratégiques de l'entreprise.

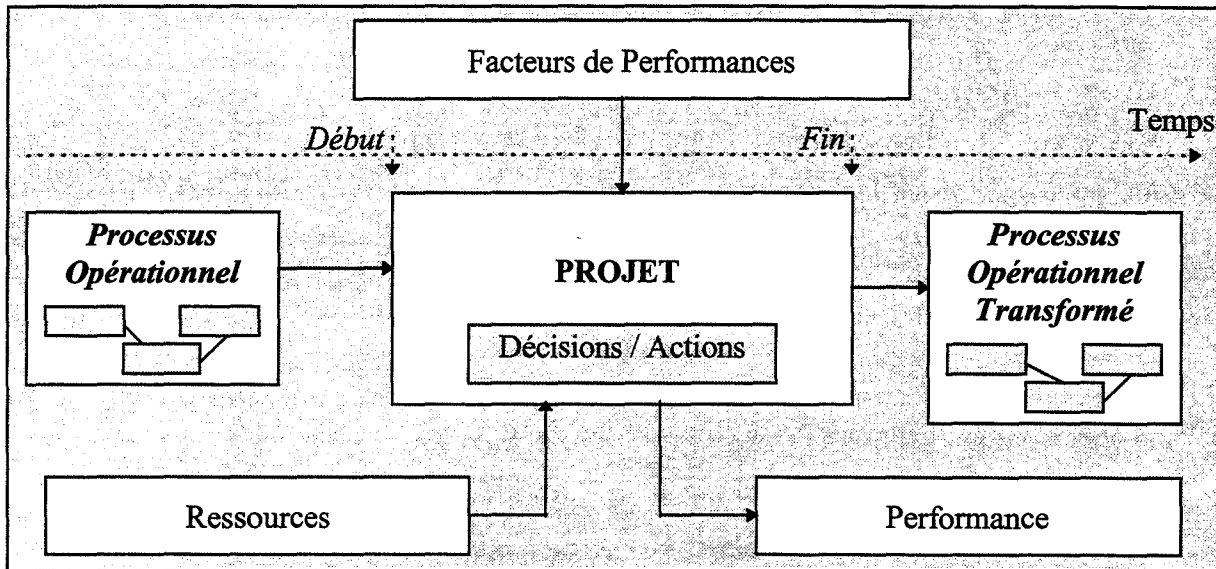


Figure II.3 « Un Processus Stratégique »

Ils répondent à un objectif de transformation forte d'un ou plusieurs processus opérationnels, et sont caractérisés par :

- un objectif : faire franchir un « saut de performance » à un ou plusieurs processus opérationnels,
- une organisation spécifique : une équipe projet qui a la responsabilité du processus stratégique, mais qui sait mobiliser, impliquer les acteurs déjà engagés dans les processus opérationnels existants, qui sait activer la communication,
- une entrée : un processus opérationnel existant,
- une sortie : ce processus opérationnel remis en question et transformé,
- un coût : le coût du projet et des implications en moyens et en temps qu'il suppose, le coût de ses effets en termes de réorganisation,
- un facteur temps : la temporalité du projet,
- des performances : la performance est double : d'un côté, et c'est l'essentiel, le « saut de performance » qui aura été obtenu du processus opérationnel concerné et donc aussi des

activités qui le composent, d'un autre côté, la performance du projet lui-même, qui est moins économique que sociale : elle réside avant tout dans la qualité des implications qui auront été obtenues, et donc, dans la qualité de l'explication des enjeux stratégiques qui aura été promue au sein de l'ensemble des acteurs concernés.

2.2 Une Approche Systémique de Modélisation

Le deuxième principe qui servira de fondement théorique au choix d'une méthode de modélisation et à la construction du modèle de compréhension est l'*approche systémique*. En effet, nous avons vu dans le chapitre I que les organisations productives formaient des systèmes complexes et que l'une des manières d'appréhender cette complexité était d'avoir une vision systémique [Burlat et al. 95].

Les premières études sur les systèmes complexes ont été menées par L.V. Bertalanffy [Bertalanffy, 76] avec la *théorie générale des systèmes* dont le principe de base est le suivant : « *Un système complexe est constitué de parties indépendantes. Le comportement de l'ensemble dépend davantage des interrelations entre parties que de leur comportement propre* ». Cette approche distribuée diffère fondamentalement de l'approche classique, où l'on considère que la connaissance de chaque entité entraîne la connaissance globale.

Un système complexe, et particulièrement un système industriel, peut être défini comme « *un ensemble dont les éléments sont en interaction* ». Cet ensemble est communément décomposé en trois sous-systèmes (fig. II.4) [LeMoigne, 84] :

✧ **Le système de décision** : qui peut être séparé en trois niveaux :

- système de finalisation : il prend les décisions stratégiques (à long terme) à partir de l'objectif donné au système.
- système de conception : il concerne d'une part les décisions tactiques (à moyen terme), et d'autre part les options de recherche et développement.
- système de coordination-sélection : il concrétise les décisions prises ci-dessus au niveau opérationnel (à court terme).

Le système de décision est constitué de l'ensemble des éléments et relations qui effectuent le contrôle et la régulation des transformations du système technologique. Il agit donc sur le flux physique par des décisions programmées (routines ou actions), ainsi qu'en situation d'information incomplète par des décisions structurées et non structurées.

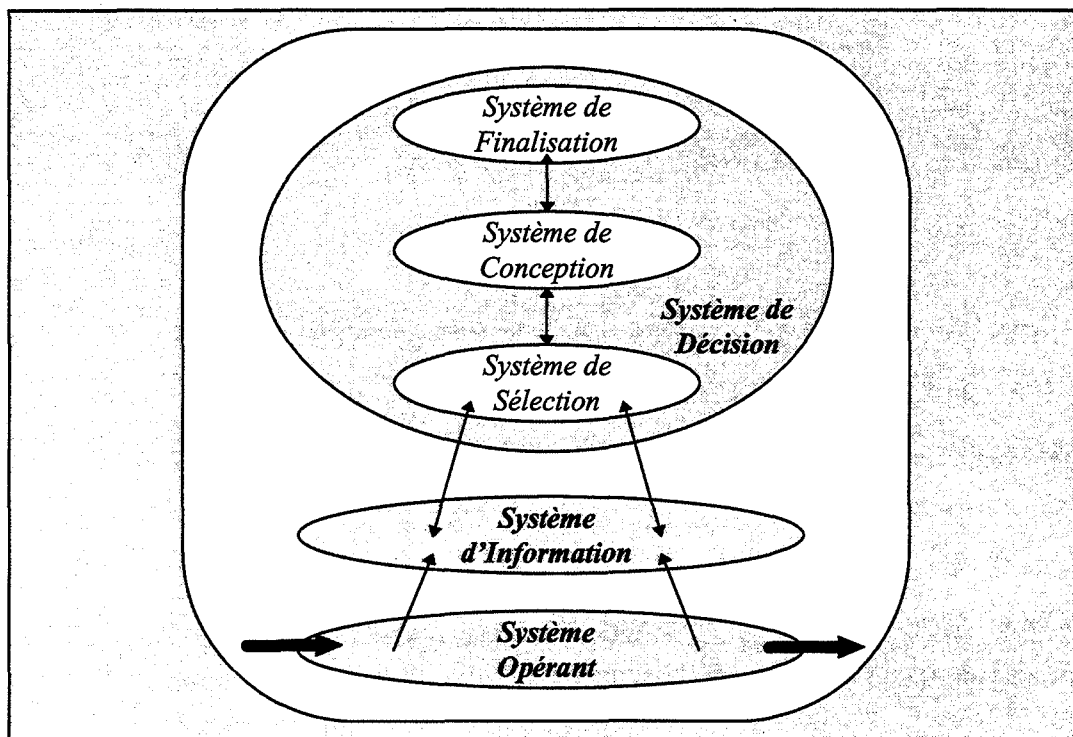


Figure II.4 « Modélisation d'un Système Industriel Complexe »

✧ **Le système d'information** : dont le rôle est la transmission des décisions prises par le système de décision au système opérationnel. Il peut se définir comme « l'ensemble des moyens et des communications qui assurent la saisie, la mesure, le contrôle, le stockage, le traitement et la distribution des informations ».

✧ **Le système opérant ou système physique** : il s'agit de l'ensemble des processus physiques de production mis en oeuvre à l'aide de ressources : humaines (opérateurs), physiques (outils, machines), et techniques (méthodes et procédés de fabrication). Le système physique est traversé par le « flux de matière » que forment les produits en cours de fabrication.

P. Lorino [Lorino, 91], pour sa part, introduit également un niveau humain pour bien prendre en considération les effets de relations et de motivations à l'intérieur du système, et décrit ainsi

une organisation productive selon quatre dimensions :

- *une dimension physique* : les équipements, la technique, les flux de matières et d'objets, l'espace et son agencement ;
- *une dimension informationnelle* : la collecte, le stockage, la circulation, le traitement des informations, les réseaux de communication ;
- *une dimension humaine* : les effectifs, les qualifications, les procédures et les systèmes destinés à gérer les ressources humaines et à induire les motivations.
- *une dimension décisionnelle* : le système de gestion, avec les processus décisionnels, les pouvoirs et les responsabilités, les règles de décision ;

Nous remarquons que la décision est dans ces modélisations séparée du système physique, et qu'elle reste centralisée, au moins dans sa représentation [Burlat, 96]. Cette vision renvoie donc toujours à une approche cybernétique de contrôle d'un système physique par un système de décision. Aussi lorsque nous utiliserons ces différents modèles généraux dans la suite de notre démarche, nous nous attacherons à en montrer les limites, et la nécessaire évolution depuis une vision monolithique et centralisée de l'information et de la décision vers une vision répartie et distribuée, et depuis une vision cybernétique vers une vision plus cognitiviste.

2.3 La Simulation

Le troisième principe qui guidera le choix et la construction du modèle de compréhension est lié à l'objectif final de ce travail, qui est de valider les théories organisationnelles proposées (réactivité, autonomie, ...) pour les organisations sur un modèle de simulation qui permette d'en observer le comportement.

R. Reed et R.D. Irwin [Thiel, 93] proposent en 1961 une définition intéressante de la simulation : « *la simulation est une représentation de la réalité à travers un modèle ou un autre moyen, qui réagira de la même manière que cette réalité sous des hypothèses définies* ».

La simulation est l'une des méthodes les plus adaptées pour résoudre les problèmes posés par l'évaluation des performances de systèmes complexes (problèmes de synchronisation, étude de comportements transitoires,...). Elle consiste à faire évoluer un modèle d'un système réel au

cours du temps afin d'aider à comprendre le fonctionnement et le comportement de ce système et à appréhender certaines de ses caractéristiques dynamiques, dans l'objectif d'évaluer différentes décisions [Ouzrout et Vincent, 95].

La modélisation, et plus particulièrement la conceptualisation du problème, est l'étape la plus importante d'un processus de simulation. La difficulté est de traduire un problème qui s'exprime en termes réels et concrets, au moyen d'un vocabulaire industriel, en un modèle constitué de primitives relativement abstraites (vocabulaire de simulation). Nous nous intéressons dans ce mémoire à la modélisation des systèmes à événements discrets représentatifs de la plupart des systèmes manufacturiers.

2.3.1 Simulation à Événements Discrets

Dans une simulation à événements discrets, les variables d'état que l'on désire connaître à tout instant sont discrètes [Leroudier, 80]. L'ensemble des valeurs que ces variables peuvent prendre constitue l'*espace d'état* du système dans lequel chaque changement d'état ou *événement* se produit à des instants appelés des *dates d'événement*. Pendant tout intervalle de temps durant lequel l'état d'une entité du système ne change pas on dit que l'entité est engagée dans une certaine *activité* ; l'état du système global à un instant donné peut donc être caractérisé par l'ensemble des activités en cours.

Quand, dans le modèle, on rencontre souvent des séquences d'événements ou d'activités similaires pour un type d'entités, on peut définir ce qui est appelé un *processus*. Un processus est la succession d'un nombre fini d'états d'une entité ou de façon équivalente la succession d'une ou plusieurs activités qui concernent cette entité.

Pour que la simulation soit possible, il faut être capable de décrire ces changements d'état par des *algorithmes*. Pour chaque événement on doit définir dans quelles activités vont s'engager les différentes entités libérées par cet événement (fin de l'activité précédente), on définit ainsi des contraintes de précedence entre les différentes activités.

2.3.2 Modélisation des Systèmes à Événements Discrets

Les événements arrivant d'une manière discrète, ils peuvent être ordonnancés dans le temps et donc simulés sur une machine séquentielle les uns après les autres.

Au cours de la simulation, les seuls temps accessibles sont des dates d'événements, l'incrément du temps se fait donc d'une date d'événement à l'autre. Ce temps est alors géré à partir d'un *échancier* que l'on peut présenter conceptuellement comme une liste linéaire d'événements ou de processus [Pritsker, 86]. La tête de liste est l'événement courant, et la fin de liste est l'événement dont la date est la plus éloignée dans le temps.

Pour pouvoir réaliser une simulation, en plus de l'échancier, il faut des procédures qui permettent de l'entretenir et de le manipuler. L'ensemble de ces programmes et de ces structures de données s'appelle un *noyau de synchronisation (scheduler)*. Un tel noyau de synchronisation existe sous une forme ou sous une autre dans tout logiciel ou langage de simulation à événements discrets (SIMULA, SIMSCRIPT, SIMAN, SLAM,...)[CETIM, 92]. Il existe différentes approches pour réaliser ce mécanisme [Cavaille et al. 87], [Jullien, 91] :

2.3.2.1 Approche par événements

Dans cette approche, on commence par répertorier tous les événements ou changements d'état susceptibles d'être rencontrés au cours de l'évolution du système. Puis on modélise la logique de changements d'état sous la forme d'algorithmes en définissant, pour chaque type d'événement, les conditions sur l'état conduisant à l'occurrence de l'événement ainsi que les changements d'état correspondants. La simulation du système est obtenue par l'exécution des logiques de changements d'état associées à chaque événement à la date à laquelle il se produit.

2.3.2.2 Approche par cycle d'activités

Au lieu de répertorier des événements, dans cette approche on répertorie des types d'activités. La logique de changements d'état est définie en précisant les conditions nécessaires au début et à la fin d'une activité. Le déroulement de la simulation se fait à l'aide d'une horloge, à chaque

pas de temps on teste, pour chaque activité, si les conditions nécessaires à son début ou à sa fin sont remplies.

2.3.2.3 Approche par processus

Dans cette approche, la logique de changements d'état est relative à une séquence d'événements prédéterminés ou *processus*. On choisira comme processus des séquences d'événements pour lesquelles la logique de changements d'état sera toujours la même. La modélisation du système nécessite donc :

- la définition des différents processus composant le système, et pour chacun d'eux, la logique de changements d'état décrivant le cheminement, événement par événement, de l'entrée à la sortie du processus ;
- la connexion des différents processus et la spécification de leurs interactions.

Cette approche combine la simplicité de la description de l'approche par cycle d'activités et l'efficacité de l'approche par événements. La plupart des langages de simulation, SLAM SIMAN, QNAP2, etc. proposent des processus pré-programmés sous forme de primitives standard facilitant la modélisation.

2.3.2.4 Approche par objet

L'approche par objet consiste à modéliser le système par un ensemble d'objets qui dialoguent entre eux par envoi de messages ; elle est basée essentiellement sur la notion de processus [Ye, 94]. Le modèle simulé est décrit comme un ensemble de processus progressant parallèlement, chacun d'eux représentant un *objet actif* qui évolue dans le temps contrairement aux autres objets du modèle qui sont passifs [Ouzrout et al. 94a].

Les différentes entités étant exécutées en parallèles, elles ne peuvent plus être décrites par des sous-programmes (purement séquentiels), mais par des *coroutines* qui leur assurent une exécution en quasi-parallélisme (principe qui sera détaillé dans le chapitre V). Le noyau de synchronisation fournit alors des ordres du type « *activer le processus X à la date T* ».

2.3.3 Conclusion sur la Simulation

Les modèles de simulation sont capables de décrire des systèmes avec le degré de détail et de précision qui convient à la résolution de problèmes posés [Bel & al. 90]. Cette description inclut la partie physique de l'atelier mais aussi certains aspects du système de gestion de production.

Nous verrons dans les chapitres suivants que cette partie décisionnelle reste malgré tout assez réduite, ce qui nous entraînera à opter pour une approche par objet qui permet une représentation explicite de la décision, et certaines ouvertures que les langages traditionnels et les simulateurs ne permettent pas [Barbier, 89][Chiloup, 91][Barakat, 91][Balci, 90] [Hill, 93].

3 LE PROCESSUS DE MODELISATION

A partir des concepts définis ci-dessus, et de la volonté de construire un modèle de représentation pertinent pour aboutir à un modèle de simulation, nous allons analyser la modélisation en productique, présenter certaines méthodes, pour finalement en choisir une et construire notre modèle de compréhension.

3.1 La Modélisation en Productique

Un modèle est défini par J.L. Le Moigne [Lemoigne, 90] comme « *l'action d'élaboration et de construction intentionnelle, par composition de symboles, de modèles susceptibles de rendre intelligible un phénomène perçu complexe, et d'amplifier le raisonnement de l'acteur projetant une intention délibérée au sein du phénomène...* »

Cette définition fait apparaître la notion d'intentionnalité dans la construction d'un modèle qui n'est jamais objective et neutre (fig. II.5) « *l'action de modéliser n'est pas neutre et la représentation du modèle n'est pas disjoignable de l'action du modélisateur* ».

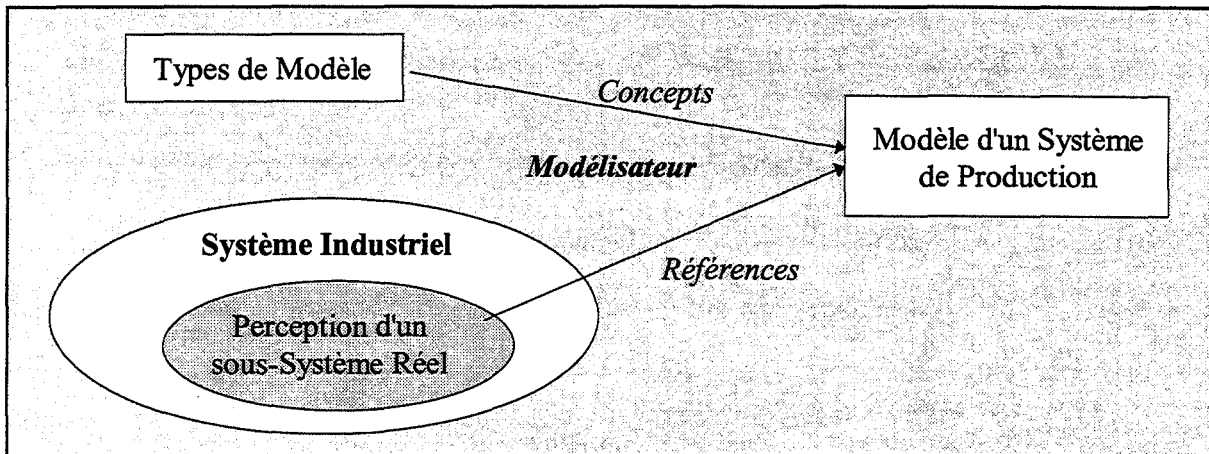


Figure II.5 « Modélisation d'un Système de Production »

Lorino [Lorino, 91] précise également que la validité d'un modèle ne dépend pas uniquement de sa distance au réel, mais de sa capacité à favoriser les communications pour faire partager des problèmes et de son aptitude à générer une interprétation qui oriente les comportements. Il ne s'agit pas de « *trouver la représentation exacte qui reproduit le plus fidèlement la réalité, mais la représentation efficace qui fait prendre de bonnes décisions et amorce un processus d'apprentissage* ».

3.1.1 Méthodes d'Analyse et de Conception pour les Systèmes de Production

Il existe un très grand nombre de représentations de systèmes de production, certaines ont un domaine d'application assez large, tandis que d'autres sont plus spécialisées. H. Pierreval fait une comparaison d'un certain nombre de méthodes [Pierreval, 90] ; il ressort de cette étude que la majorité d'entre elles est basée soit sur une étude approfondie du système d'information (SADT / RT, DFD, MERISE,...), soit sur le système de décision (GRAI, AMS,...). Les seules méthodes qui s'intéressent réellement au système physique sont des méthodes telles que : le Grafcet, la simulation, les réseaux de Petri, etc. (fig. II.6) [Doumeingts et al, 91].

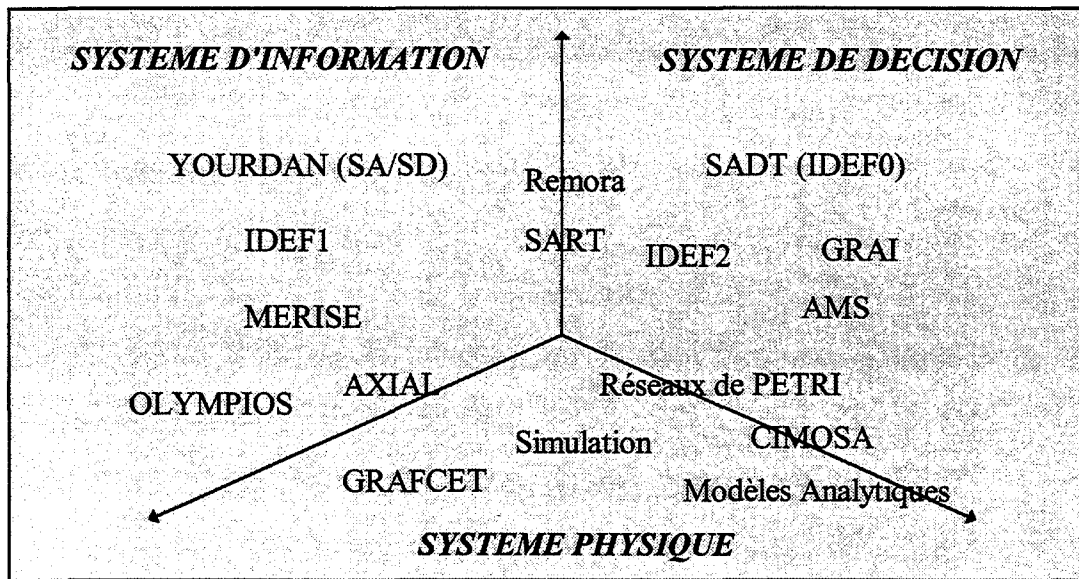


Figure II.6 « Les Méthodes d'Analyse/Conception pour les Systèmes de Production »

Dans notre étude, nous laisserons de côté les modèles à caractères événementiels (Grafcet, réseaux de Petri,...) liés à des problèmes d'automatique séquentielle, ainsi que les modèles destinés à la conception de systèmes d'informations (SADT, DFD, OLYMPIOS, MERISE,...) [Pierreval, 90] [Maire, 91] [Rochfeld, 93] [Braesh, 91] pour nous intéresser aux méthodes se focalisant sur le système décisionnel (GRAI, AMS, CIMOSA) et à leur adaptation possible en modèles de simulation.

3.1.1.1 La Méthode GRAI

La méthode GRAI [Adama, 84] est basée sur un modèle conceptuel qui vise à identifier selon une vision systémique les composants d'une organisation ainsi que leurs relations sur le plan statique et dynamique. Ce modèle conceptuel décrit un système complexe et hiérarchisé décomposé en activités décisionnelles, informationnelles et physiques. La représentation graphique (fig. II.7) du modèle montre les sous-ensembles décisionnel (ensemble des centres de décision qui pilotent le flux physique) et informationnel (ensemble des informations d'origine interne ou externe permettant d'alimenter le système de décision) dont la réunion constitue le système de gestion de production, ainsi que le sous-système physique.

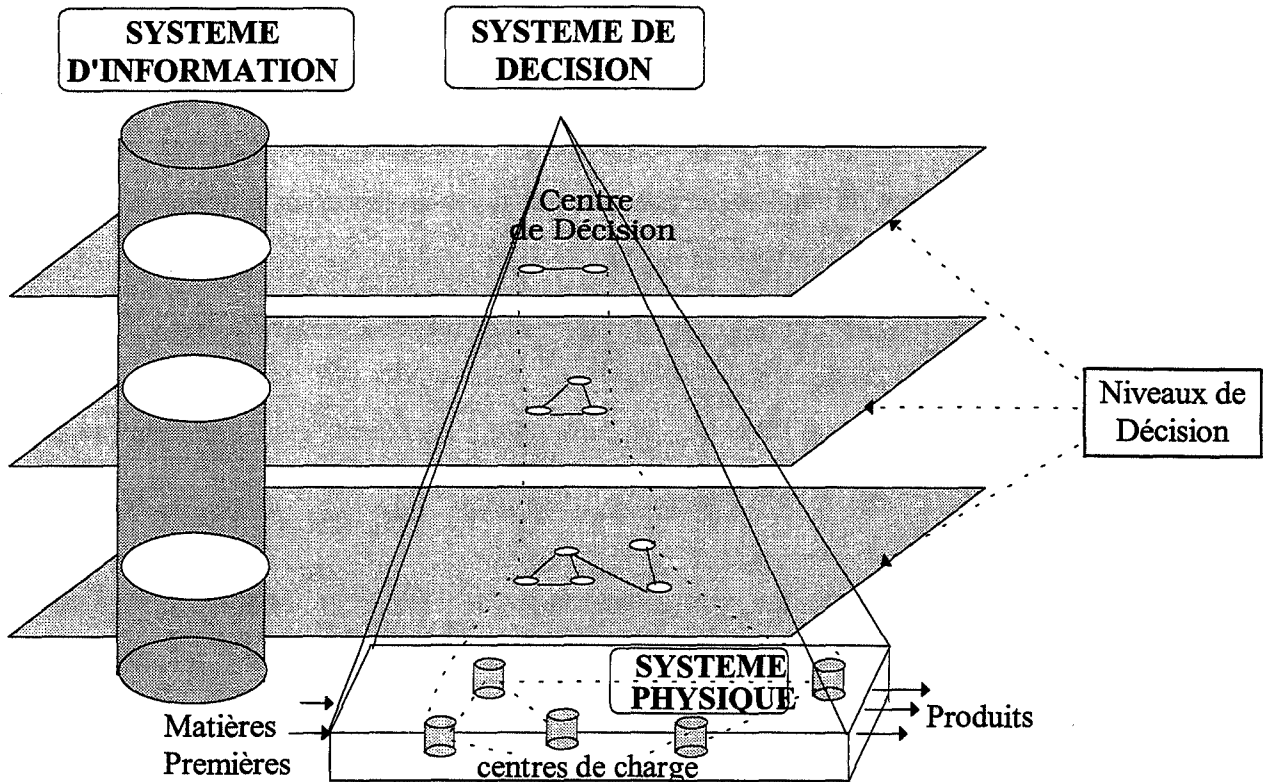


Figure II.7 « La Méthode : GRAI »

Dans sa représentation globale, la méthode GRAI sépare donc les activités d'information, les activités de décision et les activités physiques. Peu orientée vers l'analyse du flux physique de production, elle est en revanche particulièrement adaptée à l'étude du système décisionnel, qu'elle détaille selon une décomposition en fonction de critères à la fois temporels et fonctionnels [Doumeingts, 90] :

↳ **Les critères fonctionnels** qui permettent de distinguer les activités selon les fonctions de base auxquelles elles appartiennent. Le plus souvent ces fonctions sont : planifier, approvisionner, gérer les ressources, fabriquer, contrôler et livrer,...

↳ **Les critères temporels** exprimés en termes d'*horizon* de temps (rejoignant les niveaux de décomposition de H. Ansoff [Ansoff, 89]) pour des prises de décision, et de *période* relative à l'intervalle de temps séparant la remise en cause des décisions. Cette classification renvoie naturellement à la vision pyramidale classique de la hiérarchie comme le montre bien la forme géométrique du système de décision (fig. II.7).

Chaque centre reçoit un cadre de décision d'un niveau supérieur ou d'un même niveau, et définit des cadres de décision pour les centres de décision de niveau inférieur ou de même

niveau. Ce cadre de décision oriente l'activité du décideur, il contient en particulier des ordres, des objectifs, des moyens d'action, des limites, et des procédures de mise en oeuvre. En permanence, le décideur compare les résultats atteints avec les performances qu'il attend et agit par modification des cadres de décision, et par ajustement sur les processus physiques.

La méthode GRAI mène également à l'établissement d'une grille d'activité qui matérialise la situation des différents centres de décisions les uns par rapport aux autres, et qui met en évidence les liens décisionnels ou les cadres de décision qui les relie. Trois fonctions de base constituent l'ossature de la grille d'activité :

❶ *la fonction de planification* qui vise à déterminer le plan de réalisation des produits demandés compte tenu des matières approvisionnées et des ressources affectées à la fabrication, et qui assure la synchronisation et la coordination des centres de décision.

❷ *la fonction de gestion des ressources* qui optimise l'utilisation des compétences des personnels et des machines, conformément aux stratégies de l'entreprise, et dans un objectif général de maîtrise des coûts.

❸ *la fonction d'acquisition* qui regroupe les activités d'achat externe de matières et de composants, et les activités de gestion interne des pièces.

3.1.2.2 Le modèle CIMOSA

Le modèle CIMOSA [Amice, 89] est une architecture normative destinée à favoriser l'évolution des entreprises manufacturières vers le concept CIM (Computer Integrated Manufacturing). Cette architecture est définie par un cadre conceptuel, appelé « cube CIMOSA », dont l'objectif est de fournir une méthode et des outils de modélisation pour assister l'utilisateur dans le développement du modèle particulier de son entreprise ; il s'articule autour de trois axes de modélisation orthogonaux (fig. II.8) :

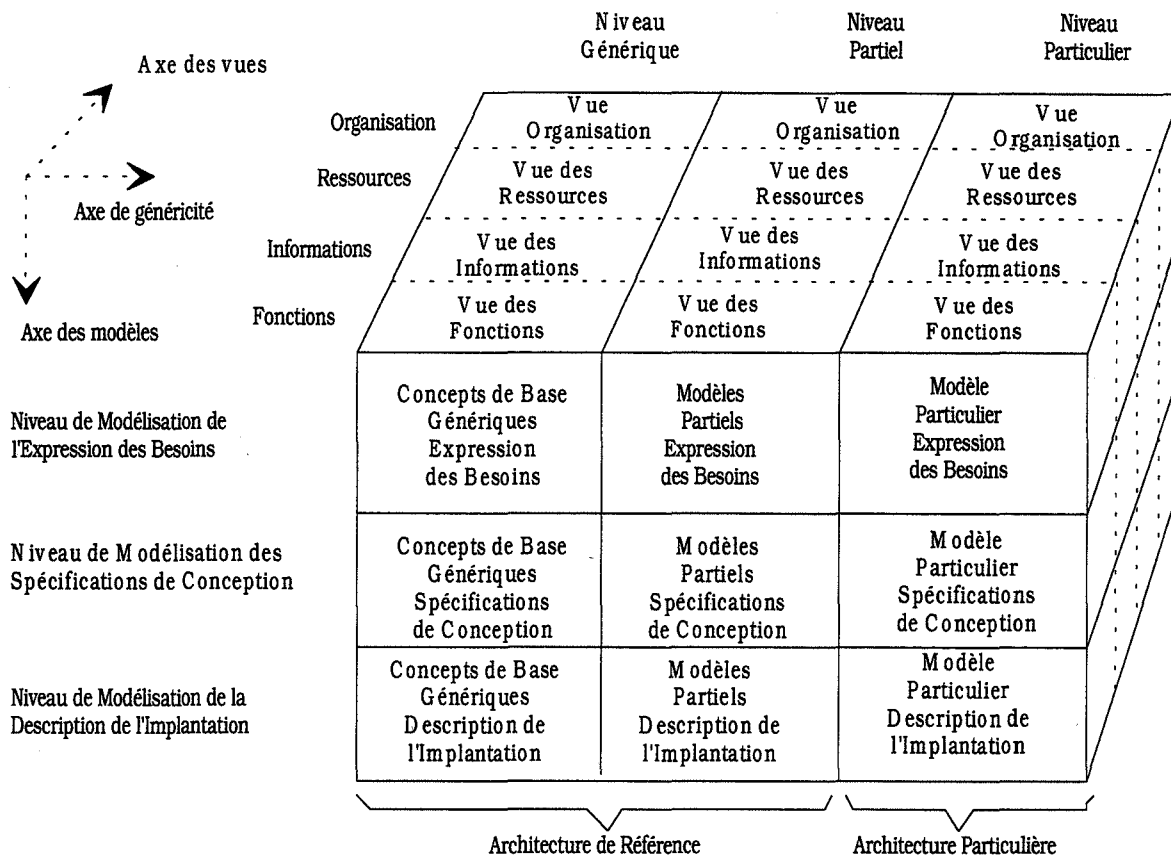


Figure II.8 « Le Modèle : CIMOSA »

❶ un **axe des vues** qui décompose l'entreprise selon quatre points de vue : les fonctions (fonctionnalités et comportement dynamique du système), les informations (description du système d'information CIM), les ressources (composants matériels, logiciels et humains du système), et l'organisation (responsabilités individuelles, cadres de décision et niveaux).

❷ un **axe de généricité** qui part d'une description générique applicable à toute entreprise, passe par des modèles partiels moins généraux ou moins complets, et aboutit à des modèles particuliers d'entreprise spécifique.

❸ un **axe des modèles**, qui part de l'expression des besoins (définition des objectifs, élaboration du cahier des charges), passe par la conception des spécifications du système CIM (analyse conceptuelle, analyse du système d'information,...) et aboutit à la description de l'implantation (matériel utilisé, distribution des informations,...)

Le choix d'une combinaison à partir de la position sur chacun des trois axes mène à un type de modèle (définition, conception, ou réalisation), selon un point de vue privilégié (fonctionnel, informationnel, de ressources, ou organisationnel), plus ou moins particularisé (générique, partiel, ou particulier) [Gaches et al. 93] :

- ***Du point de vue fonctionnel***, une entreprise est vue dans CIMOSA comme un ensemble de *domaines* (parties disjointes de l'entreprise) formés de *processus* qui interagissent entre eux (traitement des commandes de clients, planification de la production, traitement de nomenclature, etc.).

- ***Du point de vue informationnel***, la plupart des entrées/sorties des activités sont des *vues d'objet*, qui correspondent à des objets tels qu'ils sont perçus par un utilisateur ou une application.

- ***Du point de vue de la gestion des ressources***, CIMOSA distingue deux classes de ressources : les ressources actives, appelées *entités fonctionnelles* et les ressources passives (outils, palettes, etc.), appelées *composants*. Les entités fonctionnelles exécutent les opérations des activités de la vue des fonctions, il en existe trois grandes classes : les *machines* (machines outils, systèmes de transport, robots, etc.), les *applications* (systèmes de CAO, M.R.P., logiciels d'ordonnancement, etc.) et les *hommes* (opérateurs, décideurs, gestionnaires, concepteurs...).

- ***Du point de vue organisationnel***, CIMOSA fournit des concepts de base génériques pour décrire les *responsabilités* dans l'entreprise, les niveaux organisationnels (*unité d'organisation* et *cellule d'organisation*) et les cadres de décision.

3.2 L'Analyse Modulaire des Systèmes (AMS)

Après cette description de deux méthodes systémiques (GRAI, CIMOSA) axées sur les niveaux décisionnels et organisationnels, nous allons présenter plus en détail la méthode de modélisation (AMS), sur les bases de laquelle ont été fondés les réflexions qui ont permis d'aboutir à notre modèle de compréhension, puis nous justifierons le choix de cette méthode.

3.2.1 Description de l'AMS

L'analyse modulaire des systèmes (AMS) est une méthodologie de description des organisations mise au point par J. Mélése [Mélése, 91]. Elle est destinée à la compréhension et à la formulation des problèmes qui concernent les organismes complexes, à partir de la description de leur structure et de leur fonctionnement. Elle conduit à « *établir une maquette de l'entreprise qui permet de lui appliquer les points de vue et les principes issus de la théorie de systèmes* ».

J. Mélése précise que l'AMS n'est pas un modèle général d'entreprise mais plutôt « *un langage qui favorise la communication entre les membres de l'entreprise sur les problèmes de responsabilités, d'objectifs, de contrôle, de structure,...* » L'apport principal de la notion de système consistant justement à mettre au premier plan l'ensemble des relations entre les éléments.

L'AMS permet de représenter sur un modèle unique, à la fois le flux physique de production et le comportement décisionnel des acteurs (fig. II.9).

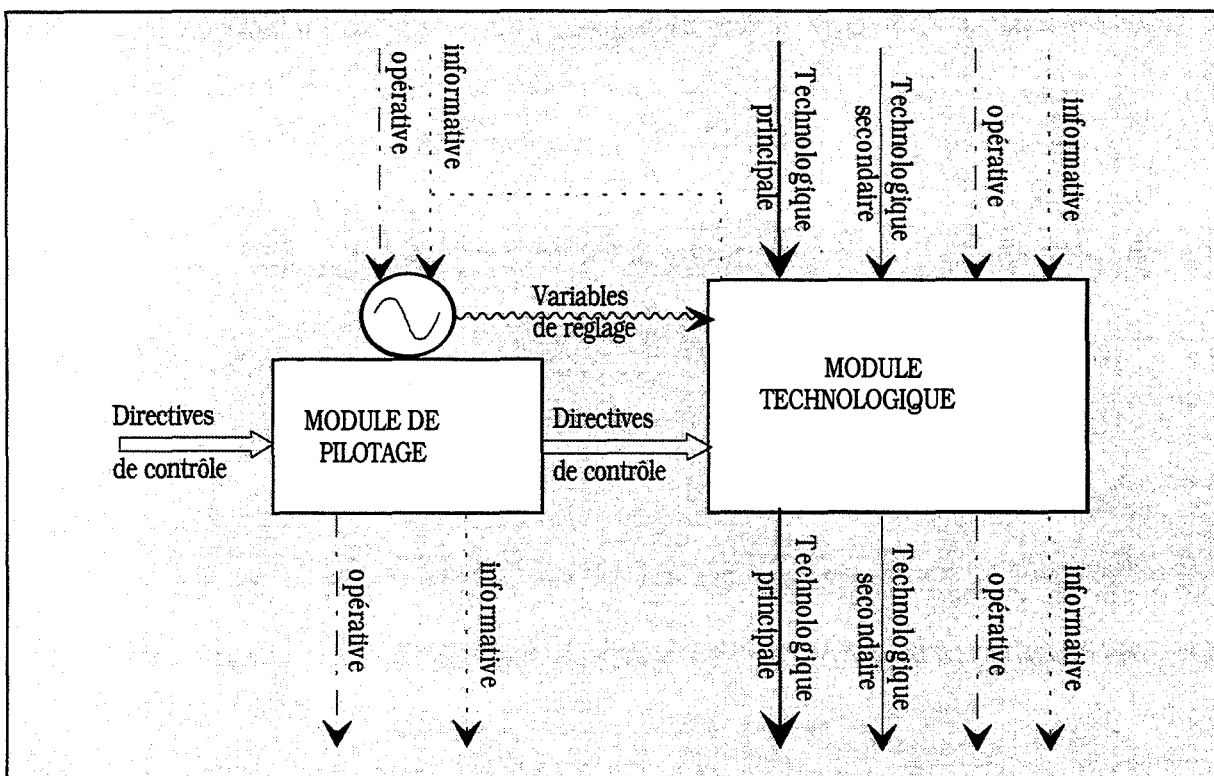


Figure II.9 « Le Modèle Générique de l'AMS »

Les deux modules de base qui constituent l'entité élémentaire du modèle, à partir de laquelle va être représentée la structure organisationnelle de l'entreprise, sont le « Module Technologique » (M.T) et le « Module de Pilotage » (M.P) :

❶ Le « Module Technologique » : L'activité principale d'une entreprise industrielle (transformation physique de matières premières et de composants en produits finis) est représentée dans l'AMS par une boîte nommée *module technologique*. Nous retrouvons autour du module technologique :

- un flux technologique principal qui correspond à l'activité essentielle de transformation,
- un flux technologique secondaire de matériel nécessaire à la transformation,
- un flux opératif d'informations nécessaires à la transformation,
- un flux informatif d'informations utiles mais non indispensables à la transformation.
- des directives et des variables de réglages provenant du module de pilotage

Ces modules de transformation sont considérés par J. Mélése comme des machines non autonomes, qui doivent être dirigées en permanence par des modules de pilotage.

❷ Les « Modules de Pilotage » : Dans la terminologie de l'AMS, les modules de pilotage ont pour mission de contrôler et de réguler les transformations opérées par les modules technologiques. Pour cela, le module de pilotage reçoit :

- des entrées opératives d'informations nécessaires pour transformer les directives reçues,
- des entrées informatives internes sur le fonctionnement de l'activité propre,
- des entrées informatives externes utiles mais non indispensables pour sa mission principale.

Le module de pilotage émet à son tour vers les autres modules :

- des sorties opératives nécessaires à la réalisation de la mission d'autres modules,
- des sorties informatives utiles, mais non indispensables, à la mission des autres modules.

Les directives de contrôle proviennent d'un niveau (hiérarchique) supérieur et entrent dans le

module de pilotage, qui les précise et les transforme en directives de niveau propre (pour le M.T correspondant). Des variables de réglages sont émises directement au module technologique, par le module de pilotage, comme résultat d'un processus local de décision.

Dans l'exemple d'un atelier d'usinage (fig. II.10), les modules de pilotage et technologique prennent la forme suivante :

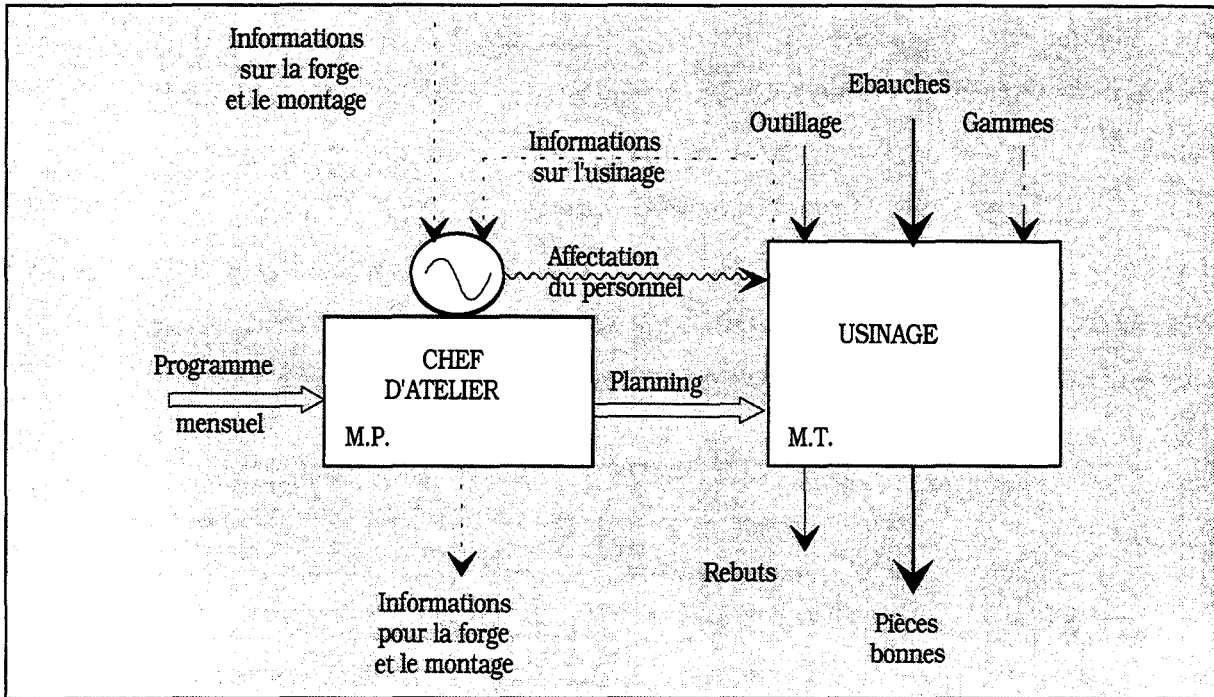


Figure II.10 « Exemple : Atelier d'Usinage »

Sur cet exemple, le **module technologique** transforme des ébauches en pièces usinées (*flux technologique principal*). Cette transformation correspond à la mission première du module technologique, et est rendue possible par des outillages (*flux technologique secondaire*) et par des gammes de fabrication (*entrées opératives*). En sortie, le module produit, outre les pièces bonnes, des pièces à rebuter (*flux technologique secondaire*).

Le **module de pilotage** de l'atelier d'usinage est identifié à un chef d'atelier qui reçoit des directives d'un niveau supérieur (programme mensuel de fabrication) et émet des directives de niveau propre vers l'atelier (planning journalier de travail). Ce module remplit donc une mission de transformation d'ordres en provenance de la direction et constitue en cela un niveau de la chaîne hiérarchique de contrôle et de commande de l'entreprise.

Notons d'autre part que le module de pilotage communique avec son environnement. Ainsi le chef d'atelier reçoit des informations en provenance de son atelier d'usinage, mais également de l'atelier amont de forgeage et de l'atelier aval d'assemblage (fig. II.11). Il fournit lui-même des informations aux pilotes des deux autres ateliers.

Cependant, dans l'AMS, il est admis que les modules de pilotage possèdent « une certaine latitude décisionnelle » représentée par les variables de réglages. Le concept d'autonomie est donc présent dans ce modèle de représentation, et apparaît sous la forme d'un processus décisionnel local qui réalise la régulation du module technologique. J. Mélése précise que ces variables de réglages se distinguent des directives de contrôle précédentes par le fait que le module de pilotage ne reçoit pas, à intervalles réguliers, des directives à détailler, mais est libre d'intervenir au moment où il le souhaite. Dans l'exemple de l'atelier d'usinage, le chef d'atelier peut affecter le personnel aux machines en respectant certaines grilles de qualifications. Il réalise ainsi une opération de réglage sur le module technologique qu'il pilote.

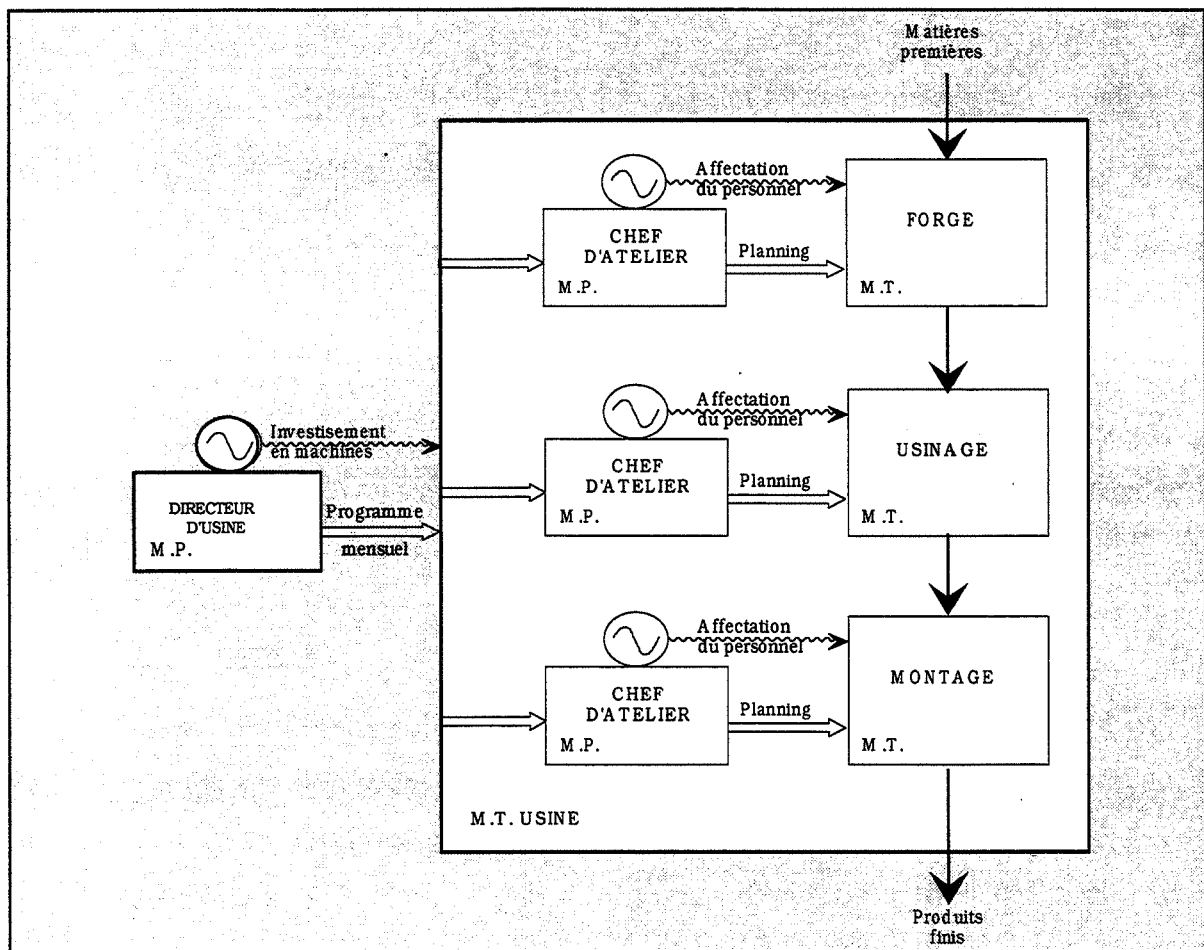


Figure II.11 « L'Emboîtement des Modules »

Cette description fonctionnelle permet de représenter l'organisation par un phénomène d'emboîtement de modules représentant les différents niveaux (fig. II.11). J. Mélése [Mélése, 91] indique que ce formalisme s'applique également à des opérations administratives de transformation pour lesquelles le flux principal est un flux d'information (processus de paie, de traitement comptable d'informations,...). Les modèles descriptifs d'entreprises industrielles selon l'AMS pourront donc comprendre dans le cas général à la fois des M.T qui opèrent des transformations de matières premières en produits finis, et des modules administratifs qui transforment de l'information.

3.3 Justification du Choix de l'AMS

Les deux méthodes présentées précédemment (GRAI et CIMOSA) sont des méthodes qui se basent sur des fondements systémiques, mais au niveau de l'équipe Etude et Modélisation des Systèmes Industriels (EMSI) à l'école de Mines de Saint-Etienne [Burlat, 96], nous avons choisi de nous baser sur la méthode AMS pour la construction d'un modèle distribué, cognitif et systémique des organisations productives. Nous allons donc préciser les raisons de ce choix.

3.3.1 Comparaison des Méthodes

3.3.1.1 La Méthode CIMOSA

Ce qui nous a paru intéressant au niveau de la méthode CIMOSA est la démarche retenue pour aborder les problématiques d'intégration des systèmes industriels. En effet, pour CIMOSA, *« le problème de l'intégration dans les entreprises manufacturières concerne la capacité à faire communiquer et travailler ensemble les divers composants de l'entreprise (hommes, machines, systèmes informatisés,...) dans un environnement distribué et de manière coordonnée et cohérente en fonction des objectifs de production à atteindre »*.

Mais, dans ce cadre, l'approche CIMOSA traite l'intégration essentiellement à travers le point de vue de la normalisation et de l'automatisation du traitement et de l'accès à l'information, ce qui mène les auteurs qui décrivent cette méthode à une définition de la productique comme

« l'utilisation rationnelle de la technologie de l'information dans la technologie manufacturière » [Amice, 89]. En conséquence, si le modèle CIMOSA est bien destiné à favoriser l'intégration des systèmes de production, il concerne en réalité essentiellement la composante technologique de cette intégration : nous sommes dans un schéma lié au concept CIM, dans lequel toutes les tâches - de la conception des produits à leur expédition, en incluant l'assemblage, le stockage, la manutention, ainsi que le contrôle qualité ou la maintenance des machines - seraient gérées et contrôlées de façon informatique. Or, nous ne souhaitons pas centrer notre modélisation sur la composante technologique parce que nous recherchons un modèle d'innovation qui permette la compréhension des phénomènes productifs et la création de solutions innovantes, et non un modèle de normalisation.

3.3.1.2 La Méthode GRAI

Les concepts de base sur lesquels s'appuie la modélisation GRAI ne correspondent pas pleinement aux problématiques des organisations productives telles que nous les avons identifiées dans notre démarche.

En premier lieu, les activités de décision sont systématiquement décomposées par la méthode GRAI selon un critère fonctionnel, qui mène à une vision segmentée des activités plus proche de l'entreprise *taylorienne* que de l'organisation *productive flexible et intégrée*.

Certes, la grille GRAI permet de visualiser les liaisons décisionnelles et informationnelles entre centres de décision, mais la volonté d'intégration dans le but d'économiser le temps des transferts verticaux d'information, de rapprocher les niveaux de décision du terrain d'action, de réduire les temps de réaction, et de gagner ainsi en flexibilité renvoie davantage à la nécessité de représenter l'autonomie décisionnelle de chaque cellule plutôt que la circulation des ordres entre centres fonctionnels. D'ailleurs, dans des démarches organisationnelles du type juste-à-temps les tâches, auparavant distinctes (comme le contrôle de la qualité, la maintenance, la conception,...), sont à présent intégrées dans une même activité. Or dans la grille GRAI, ces tâches restent pourtant considérées comme des fonctions annexes, vis-à-vis des fonctions principales de gestion des approvisionnements, de planification et de gestion des ressources.

Ainsi, nous pensons que l'abandon constaté des regroupements fonctionnels d'activité par section homogène et par tâches spécialisées, au profit d'une évolution dans le sens de l'intégration, remet en question une grille d'analyse dont l'une des clefs d'entrée est justement la découpe fonctionnelle [Burlat, 96].

En second lieu, la décomposition des décisions par périodes renvoie à nouveau à la vision hiérarchique classique et à la traditionnelle déclinaison temporelle d'instructions données, du haut vers le bas, accompagnée de la réduction progressive de l'horizon décisionnel au fur et à mesure de la descente des niveaux hiérarchiques. Or cette classification temporelle et hiérarchique, qui structure effectivement la plupart des modèles classiques de gestion, est fortement remise en question par le déplacement actuel vers la réactivité. En effet, il semble que la décomposition en périodes temporelles ne corresponde plus aux habitudes de travail des organisations productives flexibles et intégrées, et ne reflète plus efficacement la réalité de la prise de décision au sein des nouvelles organisations productives.

C'est pourquoi, dans le cadre de la problématique que nous avons posée, nous souhaitons utiliser un modèle qui représente davantage le mouvement des organisations productives vers la flexibilité et l'intégration.

3.3.1.3 la Méthode AMS

Cette approche est particulièrement intéressante pour notre démarche car elle se situe dans le paradigme systémique, et considère la modélisation comme une méthode de communication et de présentation de l'information dans le but d'améliorer la connaissance et la compréhension du réel et de favoriser la recherche de solutions ainsi que la formulation de problèmes nouveaux.

Nous avons déterminé deux évolutions fondamentales pour les organisations productives : le rapprochement entre la structure décisionnelle et le flux physique, et le développement de l'autonomie. La représentation obtenue à partir de l'AMS semble constituer un cadre assez pertinent pour observer et comprendre les effets de ces évolutions :

❶ *Rapprochement entre Structure Décisionnelle et Physique*

↳ *Le flux Physique* : la production est abordée dans l'AMS selon une description centrée sur les processus, au sens des chaînes d'activité de transformation de la matière, et non pas sur les produits comme l'est la fonction de production classique.

↳ *Modules de Pilotage et Technologique* : ce modèle de représentation montre bien les possibilités d'imbrication entre la structure décisionnelle et le flux physique de production. En effet, la présence des différents modules de pilotage tout au long du flux physique de production renvoie effectivement à une vision répartie et distribuée de l'information et de la décision, et permet de représenter en détail le couplage permanent entre le flux physique et les processus décisionnels.

↳ *Emboîtement des Modules* : l'AMS permet la représentation simultanée de circuits hiérarchiques de directives et de processus décisionnels locaux. Les circuits de directives correspondent à la déclinaison d'ordres depuis le haut de la hiérarchie jusque vers les modules de pilotage opérationnels qui pilotent le flux physique, cette déclinaison hiérarchique est représentée sous forme de structures emboîtées de contrôle. De plus, les M.P ont une certaine latitude décisionnelle définie par des variables de réglages.

❷ *Développement de l'Autonomie par rapport à la Commande*

↳ *Rationalités* : J. Mélése [Mélése, 91] indique que « *la distinction entre analyse de système et recherche opérationnelle ou modèle économique provient essentiellement de la prise en compte globale de phénomènes complexes comportant un grand nombre de variables, certaines non quantifiables, ce qui détourne de la recherche de modèles mathématiques expliquant l'ensemble du phénomène, et fait définitivement renoncer à l'optimisation* ». Nous retrouvons ici le contexte d'information limitée qui renvoie à une rationalité de type procédurale, au sens de H. Simon, pour traiter la complexité issue de la variété et de l'enchevêtrement des interactions humaines dans une organisation.

✎ *Interaction entre Acteurs* : le modèle permet une certaine représentation des interactions entre les différents acteurs de l'organisation productive (flux opératifs et informatifs entre les modules de pilotage), ainsi qu'une représentation des conséquences des choix des pilotes sur la performance au niveau physique (flux informatifs entre M.T et M.P).

✎ *Prise de Décision et Autonomie* : la transformation, par un module de pilotage, d'une directive de niveau supérieur en directive de niveau propre est qualifiée par J. Mélése d'acte de pilotage totalement programmé. Cette transformation correspond en effet à un programme qui convertit des directives entrantes en directives sortantes, compte tenu d'entrées opératives et informatives. A l'opposé, les actes de pilotage totalement décisionnels sont également identifiés et représentés par l'AMS, ils correspondent au comportement d'un pilote qui utilise sa latitude décisionnelle pour communiquer des variables de réglage à un module technologique. Ces actes de pilotage sont proches des décisions non programmées de H. Simon. Elles sont structurées lorsque le pilote utilise les entrées opératives et informatives et fait appel à un certain nombre d'algorithmes et de structures de raisonnement pour avancer dans la phase de résolution, mais peuvent également être non structurées, par absence d'information ou de rationalité.

L'AMS permet donc la représentation d'une certaine autonomie décisionnelle au sein des organisations productives, et il s'agit à notre avis d'une ouverture essentielle par rapport aux autres modèles.

3.3.2 Possibilités d'Evolution de la Méthode

En fonction des spécificités décrites dans la partie 1 de ce chapitre, l'évolution possible de l'AMS a été un critère prépondérant du choix de cette méthode :

❶ *la facilité d'adaptation du modèle à la vision « Processus » de l'entreprise* : les modules de base de l'AMS (M.P et M.T) et leur emboîtement en niveaux successifs s'adaptent parfaitement à la description des organisations modernes faite par Lorino (cf. II.2.1). Ce qui n'aurait pas été le cas des autres méthodes systémiques étudiées (GRAI et CIMOSA).

② *l'intégration aisée de concepts méta-systémiques* : l'AMS autorise une certaine autonomie des centres de décision. C'est une base de départ intéressante pour passer d'une vision cybernétique à un principe de rationalité limitée (au sens de Simon [Simon, 74]).

La distinction entre module de pilotage et module technologique permet en effet, dans l'optique de décrire un modèle décisionnel distribué de l'entreprise, de distinguer clairement les niveaux de décision (au sens de Ansoff [Ansoff, 89]) et de combiner à cette vision l'intégration de concept méta-systémique (en terme de contrôle) par le biais de rationalités.

③ *d'un point de vue purement informatique* et avec comme objectif d'aboutir, à partir de ce modèle de compréhension, à un modèle de simulation, plusieurs raisons nous ont poussé à utiliser comme modèle de base l'AMS :

- *Le formalisme descriptif du modèle* : la dichotomie au niveau de la représentation des différents modules représentatifs de l'organisation (M.P, M.T) facilite la distinction entre processus physiques et processus décisionnels. Cette bi-modularité permet de visualiser simplement les différents flux (physique et informationnel), et les liens entre centre de décision et processus physique. Ce formalisme est très naturellement transformable en modèle de simulation, et en facilite grandement la validation et l'exploitation.

- *L'emboîtement des Modules* : la vision de l'entreprise sous forme de sous-systèmes s'emboîtant pour former un système global permet de modéliser différents types d'organisation, de la plus classique (hiérarchique), à la plus innovante (autonomie, cercle de décision,...). Ce qui favorise les comparaisons et les évaluations rendues possibles par la simulation.

- *Les Aspects Cognitifs* : les modules de pilotage, tels qu'ils sont décrit par Mèlèse, restent assez cybernétique (au sens de « commandes directes »). Mais ils forment un cadre idéal pour introduire des mécanismes cognitifs (intelligence artificielle), et évoluer d'un simple module décisionnel (algorithme, traitement,...) à un centre de décision basée sur des rationalités et doté d'intentions et de mécanismes de raisonnement.

4 LE MODELE DE COMPREHENSION : « META² »

La méthode de modélisation ayant été choisie, nous allons maintenant décrire les insuffisances observées et les évolutions que nous proposons. Puis nous définirons le premier modèle de notre processus de modélisation : le modèle de compréhension « Méta² »

4.1 Limites de l'AMS et Evolutions Envisagées

4.1.1 Insuffisances de l'AMS

L'approche AMS doit être encore précisée pour répondre à nos attentes en terme de représentation des organisations productives.

❶ **Prise de Décision : « Rationalités »** : le comportement d'un acteur au sein d'une organisation est le résultat d'une association entre d'une part des motivations guidées par des indicateurs issus de la déclinaison d'une performance globale décrétée par la hiérarchie, et d'autre part des motivations très personnelles. Or, l'AMS ne détaille pas suffisamment, pour notre démarche, le processus de motivation qui permet à un module de niveau supérieur d'orienter le comportement des sous-systèmes qui le composent.

Cette modélisation donne une représentation détaillée des comportements issus de la réalisation de programmes imposés (directives), mais n'intègre pas l'explication de leur comportement à l'intérieur de leur latitude décisionnelle. Nous devons donc enrichir pour notre étude la représentation des phénomènes d'orientation de comportement, par une modélisation plus détaillée des rationalités des acteurs ainsi que des objectifs et des indicateurs de performance qui leur sont donnés et qui motivent leurs décisions.

❷ **Prise de Décision : « Autonomie »** : J. Mélése [Mélése, 91] précise que les processus décisionnels locaux représentés par les variables de régulation (latitude décisionnelle) sont utilisés pour ajuster localement les paramètres de fonctionnement du module technologique piloté. Or dans un modèle, l'introduction du concept d'autonomie ne prend tout son sens qu'à la condition que soient également représentées les démarches cognitives d'apprentissage et de

créativité. Pour notre étude, cela signifie que nous devrons enrichir le langage de modélisation avec des concepts de représentation de la connaissance et avec des processus dynamiques d'apprentissage modifiant les connaissances de l'acteur décisionnel.

③ *Aspects Dynamiques et Temporels* : une certaine dynamique est indispensable à l'établissement d'un processus permanent d'émergence à travers l'action productive des composants du système. Ce qui ramène à la faculté d'intégrer des perturbations qui donnent à un système la capacité de s'adapter continuellement à des situations nouvelles, au lieu de se figer définitivement dans un état particulier (par exemple, un marché variable et évolutif).

Le cadre d'observation donné par l'analyse modulaire des systèmes apparaît donc intéressant pour notre démarche, mais insuffisamment développé dans la dimension cognitive. C'est pourquoi nous allons l'enrichir dans ce sens, avant d'utiliser certains éléments de son formalisme pour construire notre modèle de représentation.

* Cet enrichissement se fera en deux phases :

↳ *Au niveau du modèle de Compréhension* : Le premier point cité dans ces critiques nous pousse à enrichir le modèle de l'AMS par une représentation détaillée du concept de rationalités, et ceci pour décrire les processus d'orientation des comportements entre les différents niveaux décisionnels.

↳ *Au niveau du modèle de Simulation* : Les deux derniers points vont constituer la base du passage (dans notre processus de modélisation) d'un modèle de compréhension, à un modèle de représentation à base d'« agents » (concept d'intelligence artificielle distribuée, qui représente des entités « intelligentes » et « autonomes »), puis à un modèle de simulation (qui apporte des réponses liées aux aspects dynamiques et aux interactions entre les éléments).

4.1.2 Processus d'Orientation des Comportements

Pour étendre l'analyse modulaire des systèmes depuis une vision cybernétique vers une vision

plus cognitive, nous allons dans un premier temps détailler la représentation des phénomènes d'orientation des comportements, par une modélisation plus détaillée des rationalités qui motivent les décisions et les actions des acteurs. Pour cela, nous utiliserons l'approche de J.P. van Gigch [van Gigch, 91], et sa description méta-systémique des organisations.

Dans son modèle, J.P. Van Gigch distingue d'une part les rationalités intervenant au niveau propre et d'autre part celles qui interviennent à un méta-niveau. Pour cela, il modifie légèrement les définitions de H. Simon [Simon, 74] quant aux rationalités substantive et procédurale, et ajoute deux autres rationalités. Il estime ainsi que quatre types de rationalités coexistent simultanément au sein des structures décisionnelles :

- *une rationalité structurelle* qui oriente la constitution de la structure de prise de décision. Elle se réfère à la question de savoir quel type de décision doit être prise, comment, quand et par qui. Cette rationalité permet donc de définir les degrés de liberté de chacun des acteurs décisionnels.

- *une rationalité évaluative* qui se réfère aux objectifs visés par les décideurs, ainsi qu'aux critères d'évaluation des résultats. Par exemple, définir des seuils de performances à atteindre.

- *une rationalité substantive* constituée à partir d'un ensemble de connaissances appartenant à un paradigme. Cette rationalité renvoie à la substance du savoir et permet de guider les actions. J. P. van Gigch cite comme exemple de rationalité substantive les règles juridiques, ou encore les connaissances techniques.

- *une rationalité procédurale* qui renvoie au problème de la mise en oeuvre des procédures de prise de décision. Elle détermine la manière dont va raisonner l'acteur décisionnel face à une situation donnée.

Ces rationalités permettent de préciser les liens qui unissent des niveaux successifs d'un modèle de prise de décision méta-systémique, définie par une hiérarchie de systèmes de contrôle (fig. II.12). Au départ un élément de base, appelé modèle général de système de contrôle, est

constitué par l'association entre un contrôleur et un système contrôlé en contact avec l'environnement :

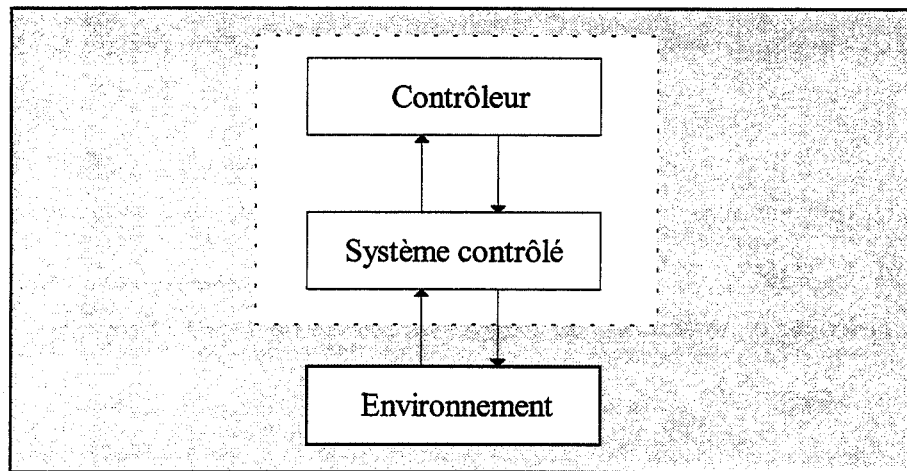


Figure II.12 « Le Modèle Général de Système de Contrôle »

Dans cette représentation, le concept de contrôle renvoie à « *toute forme d'influence appliquée par le contrôleur sur le système contrôlé* ». Il n'est donc pas restreint à la seule commande directe. Au contraire, le comportement du système contrôlé est ici *influencé*, et non simplement commandé, par les actions de contrôle du contrôleur.

Dans un cas le contrôle s'effectue directement sur le comportement du système ou de l'acteur sous forme d'une déclinaison linéaire d'ordres, tandis que dans l'autre l'orientation autorise l'autonomie. Dans ce cas, le système de contrôle exerce alors son action sur le système de représentation, et influence les comportements en déterminant des objectifs et en rendant visible les informations par le biais d'indicateurs de performances.

J. P. van Gigch affecte ensuite les quatre rationalités aux deux niveaux de l'élément de base du modèle de prise de décision. Pour cela, il traduit le « modèle général de système de contrôle » en un « modèle de prise de décision » dans lequel le système contrôlé est appelé *système informant* et est défini comme « *un processus ou une activité qui produit de la connaissance* », c'est-à-dire qui transforme des constats (informations, données,...) en décisions ainsi qu'en *méta-rationalités* destinées au niveau inférieur (fig. II.13).

Le contrôleur, qui oriente le système informant, prend le nom d'*épistémologie du système informant*. Ce contrôleur est alimenté par des rationalités issues du niveau propre et par des rationalités issues du niveau supérieur :

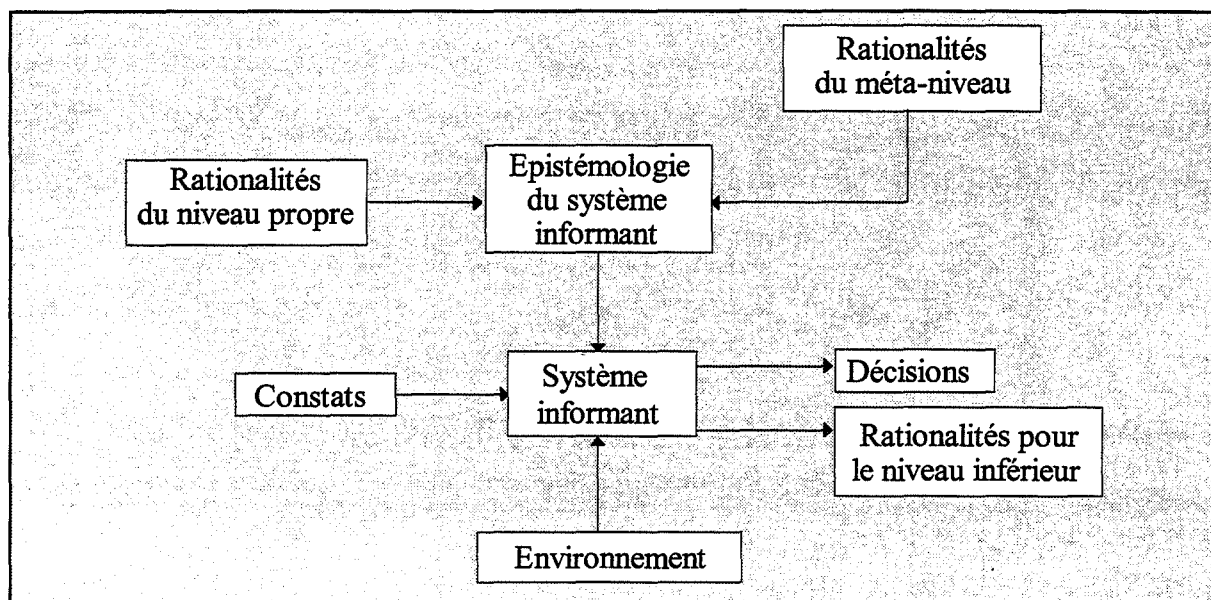


Figure II.13 : « Le Modèle de Décision Méta-Systémique »

L'auteur indique que « les rationalités substantive et procédurale sont en général issues du niveau propre, tandis que les rationalités structurale et évaluative proviennent du niveau supérieur ». Cette différence permet au niveau supérieur de donner un sens au comportement du niveau propre.

Lorino [Lorino, 91] précise que l'autonomie laissée au système s'exprime alors par la mise en oeuvre de phénomènes cognitifs qui interprètent les informations reçues. Cette vision correspond bien à l'évolution des organisations productives que nous avons décrite. Ainsi, dans le nouveau contexte industriel, il ne s'agit plus de modéliser les comportements pour les contrôler mais de chercher un système de représentation qui sera interprété individuellement et orientera les décisions vers des niveaux de performance collective satisfaisants.

J. P. Van Gigch construit au-dessus du système de contrôle précédent un contrôleur de niveau plus global qu'il nomme *méta-contrôleur* et qui peut s'articuler avec le niveau inférieur selon le schéma suivant :

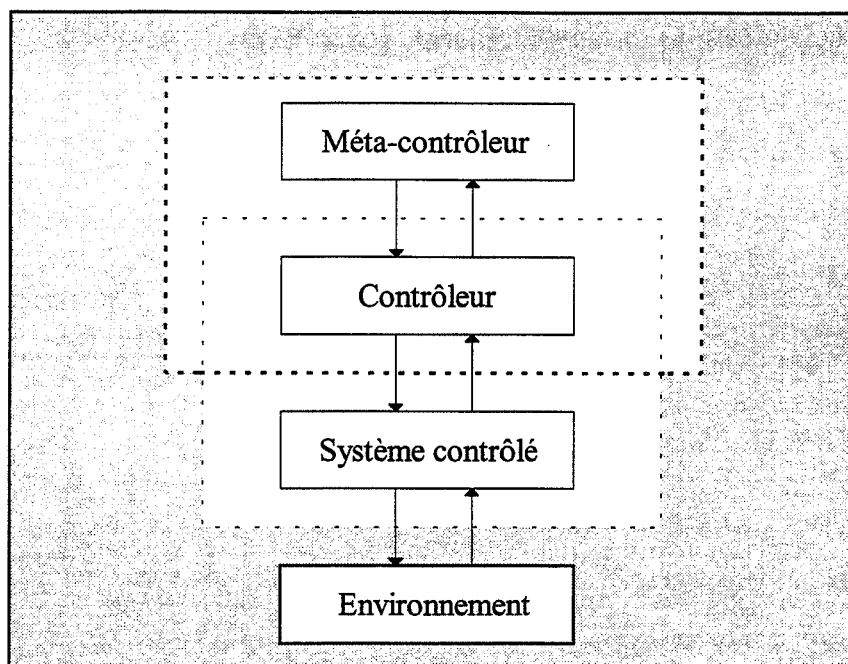


Figure II.14 « Le Méta-Contrôleur »

Le méta-contrôleur contrôle le niveau inférieur et constitue avec lui un méta-système de niveau supérieur. Ce modèle peut être étendu de façon récursive par l'ajout de niveaux supplémentaires qui correspondent à des niveaux d'organisation englobants. Il donne donc un cadre de construction d'une représentation des organisations productives intégrant la notion de hiérarchie comme emboîtement en niveaux successifs d'intégration.

Cette approche méta-systémique des structures de décision, ainsi que la décomposition des rationalités en quatre types issus pour partie du niveau propre et pour partie du niveau supérieur, nous paraissent adaptées pour décrire les différents niveaux d'intégration qui caractérisent les organisations productives, nous les utiliserons donc pour notre modèle.

4.2 Description du Modèle : « Méta² »

4.2.1 Eléments du Modèle « Méta² »

Par rapport aux notions introduites précédemment, et aux spécificités des modèles de simulation, nous allons définir quatre grandes classes d'entités qui vont nous permettre de représenter tous les éléments constituant notre système de production à simuler ; nous verrons dans le chapitre V, la manière dont elles seront implémentées :

❶ **Des Entités de transaction** : cette catégorie comprend l'ensemble des entités, aussi bien physiques qu'informationnelles, qui vont circuler dans le système. On peut citer pour illustrer cet ensemble : les matières premières, les produits, les composants, les nomenclatures, les gammes, les ordres de fabrication, les décisions, etc.

❷ **Des Moyens de Production** : ce sont l'ensemble des ressources qui vont intervenir dans le fonctionnement des systèmes de production [Kellert, 92] . Il existe trois grandes catégories de ressources : les ressources que nous appellerons *principales*, ce sont des ressources telles que les machines, les transporteurs, etc. qui, au sein d'un centre d'activité, représentent les moyens de production qui vont permettre de transformer, transporter et stocker des matières. Elles utiliseront des ressources *secondaires* de type outils, outillages, ... pour transformer des matières qui seront rangées dans des *Stocks* (aussi bien les stocks intermédiaires que les dépôts ou magasins).

Le modèle *Méta²* est issu d'une synthèse entre les fondements de la méthode AMS et des concepts méta-systémiques proposés par Van Gigch. En nous inspirant en premier lieu du formalisme de l'AMS, et en particulier de sa décomposition de toute activité technique ou administrative entre un module de pilotage et un module technologique, nous allons définir une structure de base formée du couplage d'un module que nous nommerons *Centre de Décision* (CD) et d'un module que nous nommerons *Centre d'Activités* (CA) (fig. II.15) :

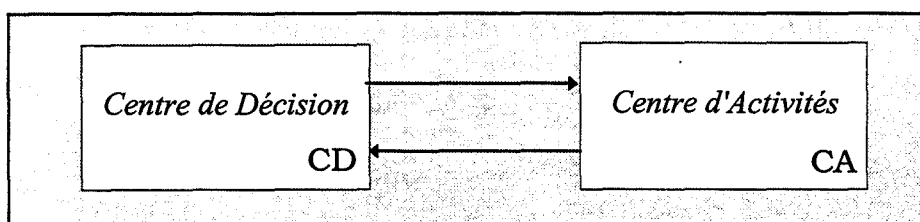


Figure II.15 « Module de Base de Méta² »

❸ **Les Centres d'Activités** : les centres d'activités sont définis comme représentant les différents processus ou chaînes d'activités que l'on retrouve dans le système : transformation, assemblage, maintenance, gestion des ressources, comptabilité,... Ces centres d'activités ont pour objectif de transformer, par une ou plusieurs actions, un flux physique (CA physiques) ou un flux d'information (CA administratifs). Ces actions correspondent à des tâches réalisées par

un individu ou un groupe et fournissant des extrants (pièces fraisées, budgets, qualification fournisseur, etc.) à partir d'intrants (matières premières, machines, informations,...).

❶ **Le Centre de Décision** : c'est un module qui oriente l'action d'un centre d'activités. Il possède des intentions propres qui vont intervenir dans son comportement, un espace de connaissances, et un système inférent qui émet des décisions et des rationalités pour le centre d'activités, à partir de rationalités de niveau supérieur, de ses intentions propres et de ses connaissances. Sa structure interne est détaillée dans le schéma suivant :

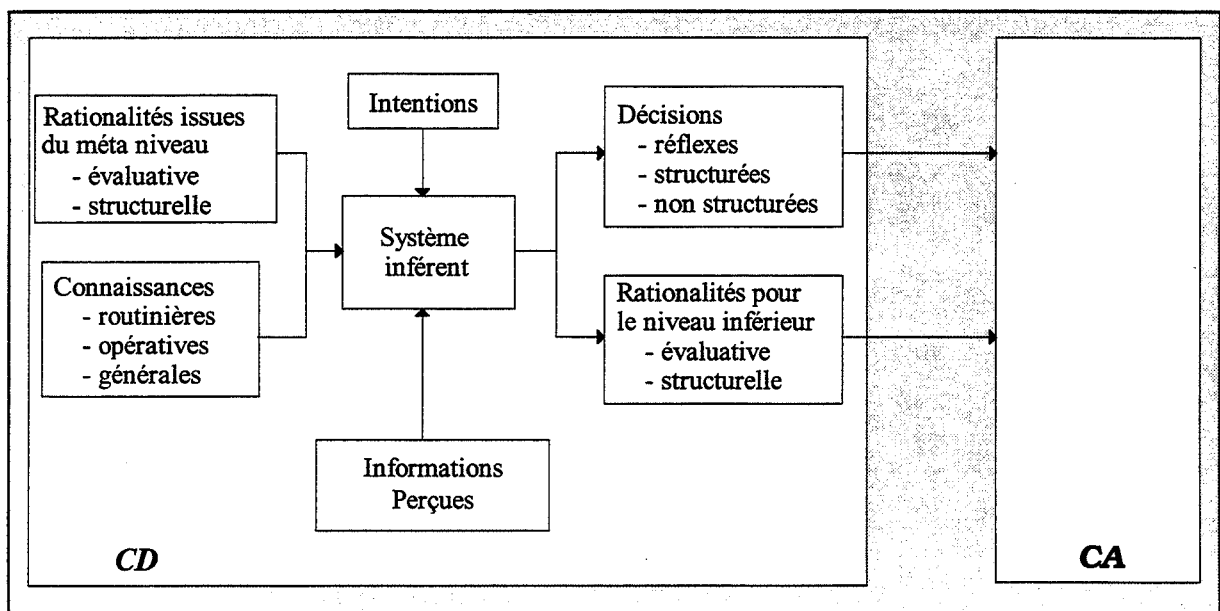


Figure II.16. « Description d'un Centre de Décision »

❧ **Connaissances** : les connaissances représentent l'expertise et le savoir-faire du centre de décision, elles peuvent être structurées en trois niveaux selon la classification issue des travaux de J. Rasmussen [Rasmussen, 83] : les connaissances routinières qui se manifestent par des actions automatiques en contexte de situations répétitives, les connaissances opératives qui sont utilisées en contexte de faibles variations à l'intérieur d'un domaine connu, et les connaissances générales utilisées dans le cadre de situations nouvelles ou exceptionnelles.

❧ **Informations Perçues** : les informations perçues par le centre de décision proviennent soit du centre d'activités (résultats, tableaux de bords,...) et concernent l'état du centre, soit de communications avec d'autres centres de décisions (échanges d'informations, directives,...), ou

soit de l'environnement (état du système, état des autres centres d'activités, indicateurs globaux,...). Nous verrons dans le chapitre V une analyse plus détaillée de la gestion des informations (structure de données commune à tous les centres). Il faut signaler à ce niveau que l'objectif n'est pas de construire le système d'information d'une organisation, mais de simuler les comportements des centres de décision en tenant compte d'un certain nombre d'informations à leur disposition.

☞ **Intentions** : la présence d'intentions traduit le fait que notre modèle accepte que la décision porte la marque de celui qui la prend. Une intention correspond à un but à atteindre par un centre de décision, ce critère individuel, éventuellement incompatible avec les rationalités évaluatives en provenance du méta-niveau, peut ainsi modifier le processus de prise de décisions. Les intentions permettent donc de représenter des comportements individuels spécifiques à l'intérieur de l'organisation.

☞ **Système inférent** : le système inférent a pour fonction d'exprimer des décisions d'action à partir du domaine de connaissance, des informations perçues, des rationalités données par le niveau supérieur, et des intentions propres. Il utilisera particulièrement l'ensemble des connaissances pour exécuter des procédures prédéfinies de résolution de problèmes, et des processus de recherche de solutions nouvelles.

☞ **Décisions** : les décisions exprimées en sortie du système inférent permettent d'activer les actions possibles du centre d'activités. Elles sont classifiées par méthodes en décisions réflexes, décisions structurées et décisions non-structurées. Les décisions réflexes sont émises par le système inférent lorsqu'il se trouve dans une situation connue, composée d'intentions habituelles, d'informations répétitives, et de rationalités connues. Il utilise alors des connaissances routinières pour construire une décision réflexe selon une procédure algorithmique. En revanche, lorsque la situation est perçue nouvelle, ou que les informations sont incomplètes, le système inférent utilise ses connaissances opératives ou générales si le problème est éloigné du domaine de compétences usuel, pour prendre des décisions à l'aide d'outils d'intelligence artificielle.

↳ **Rationalités** : des quatre rationalités du modèle méta-systémique de J. P. Van Gigch, nous ne conservons que les rationalités structurelle et évaluative qui renvoient à la structure de la prise de décision et aux objectifs des décisions. La rationalité substantive, qui se réfère au savoir et aux connaissances, ainsi que la rationalité procédurale, qui pose la question du choix des procédures de décisions, sont de niveau propre et font partie de l'espace de connaissance du centre de décision. Le centre reçoit donc depuis un méta-niveau des rationalités évaluative et structurelle, qu'il utilise pour évaluer et structurer sa prise de décision, et envoie au niveau inférieur des rationalités évaluative et structurelle.

La distinction principale entre *décision* et *rationalité* est qu'une décision doit être appliquée par le centre d'activité qui la reçoit, alors que les rationalités représentent des directives qui permettent d'orienter la prise de décision du centre.

4.2.2 Le Modèle « Méta² »

Nous allons maintenant définir un modèle descriptif d'une organisation productive en nous basant sur le mode de gestion par « activités » défini par Lorino [Lorino, 91] et décrit dans le point 2 de ce chapitre. Ce modèle sera décomposé en trois niveaux principaux : les chaînes d'activités, les processus opérationnels, et les processus stratégiques ou projets.

4.2.2.1 Le Niveau : « Chaînes d'Activités »

Le module de base composé par un centre de décision et un centre d'activités sera utilisé pour décrire les activités de transformation des flux principaux (physique et informationnel) de l'entreprise. Elles seront ensuite regroupées dans des *chaînes d'activités* (fig. II.17) lorsqu'elles seront physiquement liées par un même flux qui transite entre elles.

Notre objectif étant la simulation des systèmes de production, nous nous intéresserons particulièrement à l'analyse et à la représentation des activités liées à la chaîne de fabrication des produits. Ce qui permettra de comprendre les phénomènes liés au flux physique, et d'étudier les performances issues du rapprochement entre structure physique et décisionnelle.

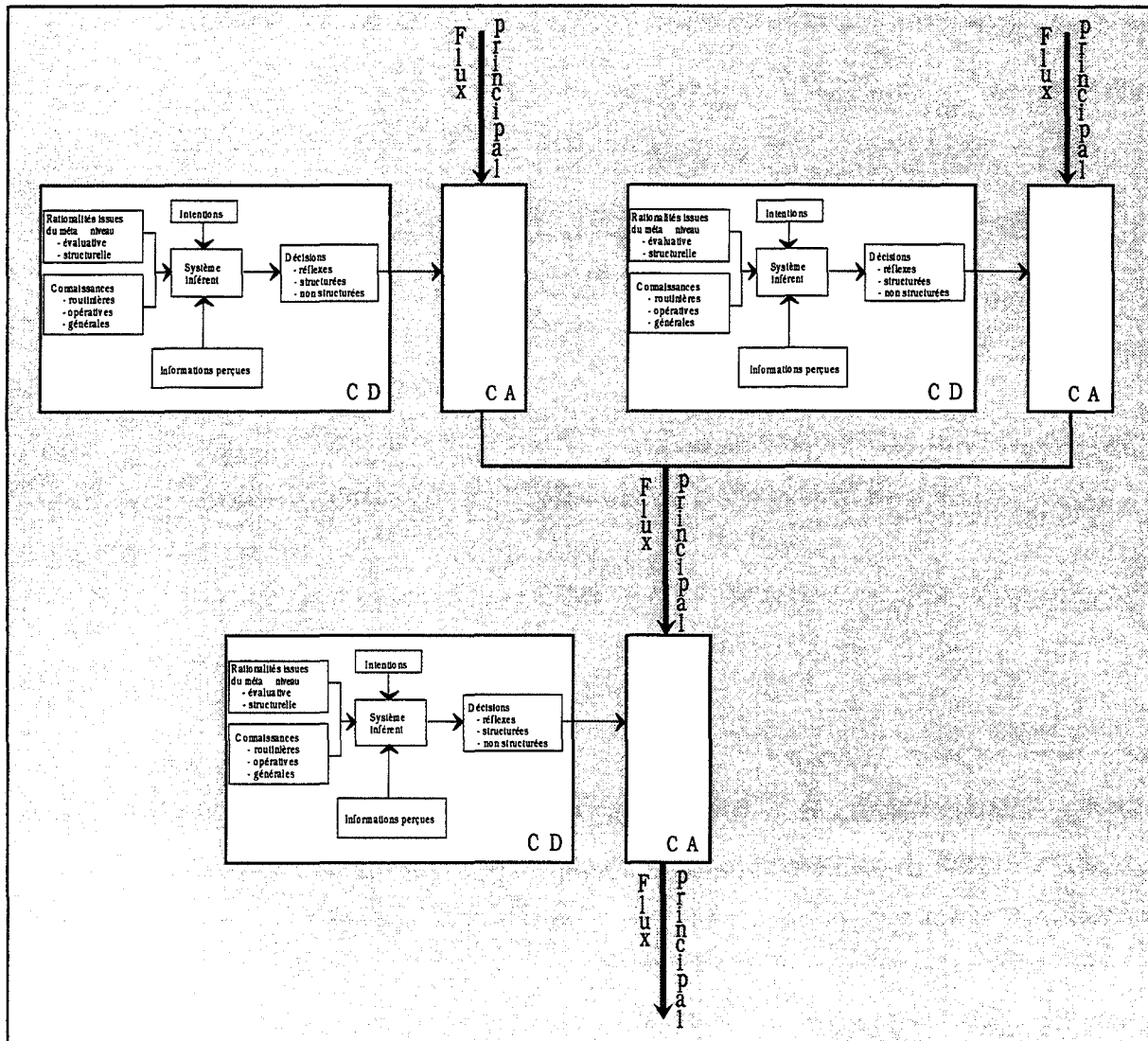


Figure II.17 « Représentation d'une Chaîne d'Activités »

4.2.2.2 Le Niveau : « Processus Opérationnels »

Le regroupement des chaînes d'activités pour former des processus opérationnels, peut être considéré [Burlat, 96] comme « *ne procédant pas d'une hiérarchie linéaire, mais bien d'une organisation méta-systémique en niveaux d'intégration* ». Le processus opérationnel est en effet un niveau d'intégration supérieur qui donne un sens global à des activités locales.

Pour représenter les processus opérationnels qui se déroulent au sein des organisations productives, nous allons faire un couplage entre un module de décision et un centre d'activité qui forme une chaîne d'activités (fig. II.18) :

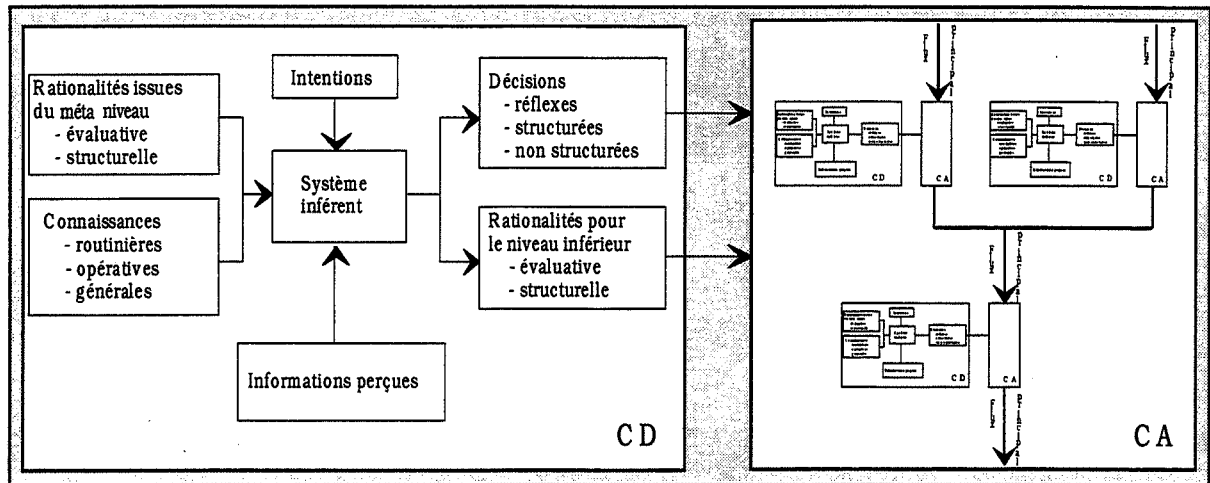


Figure II.18 « Représentation d'un Processus Opérationnel »

Le centre de décision oriente l'action de la chaîne d'activités, sa structure est la même que celle des centres de décisions de niveaux inférieurs.

Cette représentation en niveaux d'intégration méta-systémique permet de représenter aussi bien des hiérarchies directives : le centre de décision de méta-niveau peut être associé à un chef d'atelier qui dirige une ligne de production, que des structures d'organisation dans lesquelles les décisions sont prises par un collectif (équipe de production, cercle de qualité,...).

4.2.2.3 Le Niveau : « Processus Stratégiques »

Le troisième et dernier niveau correspond au niveau stratégique, ou projet, au sens de Lorino. Ce niveau concerne les actions de transformation forte d'un ou plusieurs processus opérationnels ; les processus stratégiques sont donc de méta-niveau par rapport aux processus opérationnels qu'ils transforment : *« ils leur confèrent un caractère dynamique en les faisant évoluer, et leur donnent une signification en les insérant dans un projet global et fédérateur, tandis que l'existence des processus opérationnels autorise en retour l'existence des processus stratégiques »* [Burlat, 96].

De la même manière que pour les processus opérationnels, les processus stratégiques seront représentés par le couplage entre un centre de décision et un centre d'activités. Ce dernier sera constitué de processus opérationnels (fig. II.19).

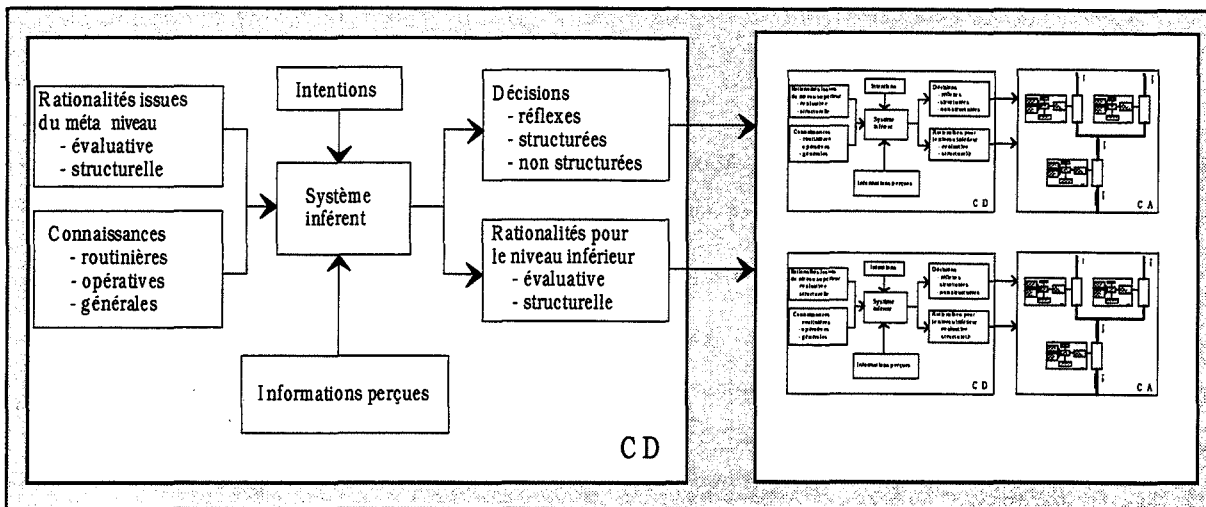


Figure II.19 « Représentation d'un Processus Stratégique »

Les processus opérationnels regroupés pour former un processus stratégique, le seront en fonction d'axes de développement définissant des visées stratégiques (objectifs à long terme) de l'entreprise. Les processus stratégiques permettront de modifier les processus opérationnels de façon à amener l'entreprise dans une configuration adaptée à ses choix stratégiques.

L'organisation productive sera donc représentée par un ensemble de processus stratégiques qui transforment des processus opérationnels, qui réorganisent eux mêmes les chaînes d'activités qui les composent. Pour cela, l'information et la décision sont réparties sur chacun des trois niveaux de l'organisation ; ce qui permettra d'évaluer les performances associées à cette distribution sur le fonctionnement de l'entreprise.

5 CONCLUSION

Le modèle de compréhension « *Méta²* » permet de décrire efficacement les organisations productives, en se basant sur une représentation distribuée des processus de décisions, et une formalisation des phénomènes d'orientations des comportements des acteurs décisionnels. Il s'adapte parfaitement à la vision *processus* des entreprises « réactives », au sens de Lorino.

Cependant, certaines critiques formulées à l'égard de l'AMS sont toujours valides dans ce modèle. En effet, l'intégration de concepts méta-systémique a permis de modéliser plus

précisément les rationalités et les motivations des centres de décisions, il faut maintenant enrichir le concept d'autonomie et évoluer vers un modèle dynamique.

Nous allons donc tenter d'apporter des réponses à ces insuffisances en poursuivant notre processus de modélisation. Deux grandes étapes seront spécifiées :

↳ Une première étape consistera à préciser le modèle « *Méta²* » en formalisant de manière plus fine les différents modules définis. Pour cela, nous allons nous baser sur des concepts d'intelligence artificielle distribuée qui définissent des modèles constitués d'entités *distribuées et autonomes* (chapitre III et IV)

↳ La seconde étape permettra, à partir de ces spécifications, de concevoir un modèle de simulation (implémentation) sur lequel une validation des principes énoncés dans ces deux premiers chapitres pourra être effectuée (chapitre V et VI).

CHAPITRE III

L'IAD ET LES SYSTEMES INDUSTRIELS

L'objectif principal de ce chapitre est de spécifier les apports des concepts et techniques d'intelligence artificielle distribuée, et en particulier des systèmes multi-agents, à la modélisation des systèmes industriels.

Pour cela, après une présentation générale des systèmes multi-agents nous analyserons l'intérêt d'utiliser ces concepts pour représenter les comportements décisionnels dans les organisations productives.

CHAPITRE III

1 INTRODUCTION

Avec l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) de nouvelles techniques de résolution de problèmes ont vu le jour, et en particulier pour les problèmes de prises de décision distribuées.

Les domaines d'applications de l'IAD sont très vastes car ils concernent des sciences aussi diverses que la robotique, l'automatique, la biologie cellulaire, la sociologie ou la psychologie cognitive. Outre l'aspect novateur qui lui confère un grand intérêt, l'IAD offre une nouvelle méthodologie de distribution des connaissances. Dans ce domaine, les systèmes multi-agents représentent les recherches les plus prometteuses menées en IAD.

L'étude du comportement de systèmes industriels a montré l'importance de la prise en compte des diverses expertises (savoir-faire) qui interviennent dans le processus décisionnel. En effet, un problème industriel est naturellement distribué et décomposé en niveaux abstraits (cf. chapitre II), et les schémas hiérarchiques classiques sont de plus en plus abandonnés pour une plus grande autonomie et une distribution des niveaux de responsabilité. L'IAD semble donc être une solution intéressante pour supporter ces mécanismes de raisonnement et de prise de décision dans ces organisations productives.

Les industriels ont compris l'intérêt de cette prise en compte globale et ont misé ces dernières années sur l'utilisation de modèles distribués pour la résolution de problèmes complexes (CAO, supervision, contrôle,...) [Lepage, 93] [Iffenecker, 92] [Ferretti, 92] [Ayel, 91]. Les temps de développement sont de plus en plus réduits pour faire face à des demandes de marché croissantes. Pour pouvoir accroître les performances des entreprises (en se basant sur les nouvelles méthodes d'organisation et de gestion), il devient nécessaire d'impliquer tous les acteurs d'un processus dans la prise en compte des problèmes.

Les techniques propres à l'IAD permettent de reproduire les mécanismes de coopération inhérents à l'entreprise. L'IAD apparaît comme un intégrateur de processus déjà mis en place dans l'organisation et offre une couche de communication et d'interface entre systèmes. Elle fournit des modèles distribués pour la modélisation de l'activité des acteurs ainsi que des règles de fonctionnement.

De plus, dès que le monde concerné se complexifie, la conception d'un modèle se heurte aux problèmes suivants :

- Prise en compte d'informations d'origines et de niveaux souvent différents, éventuellement contradictoires et pas forcément simultanément accessibles.
- Multiplicité des points de vue. Ainsi dans une entreprise, les services production et commercial ont des connaissances très différentes de l'appareil de production, qui est pourtant physiquement unique, et des critères souvent opposés pour sa gestion.
- Mécanismes de résolution devenant complexes, et donc difficilement maîtrisables, tendant à ne devenir qu'une juxtaposition de règles mal coordonnées, et parfois incohérentes.

Une approche de modélisation distribuée se base non pas sur une description globale du système mais sur une séparation en sous-systèmes autonomes décrits indépendamment, l'accent étant mis sur les interactions entre ces sous-systèmes. Cette approche présente l'avantage de faciliter la modélisation des systèmes étudiés en se rapprochant de la réalité de la structure prise en compte.

Nous présenterons dans ce chapitre la problématique et les motivations du passage de l'Intelligence Artificielle (IA) classique à l'IAD, puis nous définirons les systèmes multi-agents et les concepts particuliers qui leur sont rattachés. Et enfin, nous décrirons l'apport de ces concepts à la modélisation et à l'étude des systèmes industriels.

2 DE L'IA A L'IAD

Cette partie a pour but de positionner l'IAD par rapport à l'IA classique, de définir ses sous domaines, ses motivations, ses principes, etc.

2.1 Introduction

L'intelligence artificielle distribuée est un secteur dynamique de l'intelligence artificielle qui est né au début des années 80. Contrairement à l'IA classique qui s'appuie sur la concentration de l'expertise et du raisonnement à un système simulant un raisonnement humain, l'IAD considère que la résolution de problèmes complexes nécessite la distribution du contrôle, des connaissances, et des informations parmi un certain nombre d'entités et implique une vaste coopération.

Sous l'influence prépondérante de l'école américaine [Erman et al. 80] [Hewitt, 77] [Smith, 80], l'IAD s'est initialement préoccupée de distribuer les connaissances dans des entités physiques ou logiques. Cela a conduit à la création des architectures de type *tableau noir* (blackboard), dans lesquelles l'objectif était la résolution distribuée de problèmes. La distribution du contrôle parmi une communauté d'acteurs du système a permis par la suite d'en accroître l'autonomie, générant notamment des contraintes pour la cohérence des connaissances mutuelles. Ces acteurs sont appelés des « Agents ». Actuellement, les recherches se focalisent sur les capacités d'interaction des agents ainsi que sur l'« émergence » de comportements collectifs [Ferber, 94].

L'objectif de l'IAD est donc de concevoir des approches d'analyse et de développement de « communautés » d'agents « intelligents » qui puissent interagir d'une façon coopérative, mais aussi conflictuelle ou concurrente. Le partage de la résolution, de par sa nature, crée des problèmes cruciaux et entre autres celui du contrôle et de la coordination entre les agents.

Dans le paradigme IAD, un agent a une vue partielle du problème général. Il possède une partie de la connaissance et doit interagir avec les autres afin que le problème global soit résolu. Pour cela, l'IAD utilise un certain nombre de concepts nouveaux pour l'IA tels que la coopération, la coordination d'actions, la négociation, l'organisation, l'action et la réaction, l'émergence et la communication.

2.2 Fondements Théoriques

Nous allons étudier les fondements théoriques de l'IAD en nous intéressant à ses motivations et à la problématique posée par les systèmes distribués.

2.2.1 Motivations

Huhns Durfee, Lesser et Corkill ont identifié six raisons principales qui justifient l'étude et l'utilisation de l'IAD [Moraitis, 94] :

- *La base technologique* : l'évolution technologique des processeurs et de leurs modes de communication a permis la connexion mutuelle et l'exécution asynchrone d'un grand nombre d'unités de traitement. Ces processeurs utilisent soit une mémoire distribuée ou partagée, soit un couplage par le biais d'un réseau local de communication.
- *La distribution inhérente des applications* : dans les systèmes naturels beaucoup d'applications sont intrinsèquement distribuées. Un système d'IAD, qui gère la distribution des données, de l'expertise, de la puissance du traitement et d'autres ressources a des avantages significatifs sur une simple résolution de problèmes, monolithique et centralisée. Ces avantages concernent l'exploitation du parallélisme, la diminution de la communication en remplaçant l'envoi de données brutes vers un site central par des solutions partielles de haut niveau transmises uniquement entre noeuds proches, l'amélioration de la flexibilité en utilisant des techniques de résolutions de problèmes de différentes capacités coopérant pour résoudre les problèmes courants.
- *Modularité* : en IAD l'architecture et l'implémentation de chaque système sont fondées sur le principe de la modularité. La capacité de structurer un problème complexe en modules de traitement relativement indépendants, rend le système plus facile à élaborer et à maintenir, mais aussi plus résistant aux erreurs des niveaux logiciel et matériel qu'un module complexe et monolithique.

- *Des raisons Epistémologiques (modèle cognitif de coopération)* : la coopération et plus généralement la coordination sont des phénomènes complexes et mal formalisés, donc difficilement compréhensibles. Une manière de valider des théories sur ce type de phénomènes est de développer et de tester des modèles informatiques qui les incarnent. Les systèmes d'IAD semblent adaptés à la validation des théories dans les domaines de la sociologie, du management et des organisations [Fox, 81]. L'IAD peut permettre de comprendre les interactions entre les êtres, leurs modes d'organisation en différents groupes, comités, et sociétés pour résoudre un problème. Par ailleurs, la technologie développée peut conduire à une utilisation plus efficace des ordinateurs comme outils d'amélioration de la coordination entre les individus.

- *Fondement Social* : parmi les objectifs de l'IA, il est celui de développer des systèmes qui deviennent partie de notre monde quotidien. Ces systèmes, afin d'être intégrés dans une société d'agents « intelligents », doivent avoir une capacité de coopération et de coordination entre eux et avec leur environnement. L'IAD représente une première étape vers cet objectif.

- *Synergie (nouvelles classes de problèmes)* : il existe de très vastes problèmes dans un système centralisé. Ces problèmes peuvent parfois être résolus uniquement par coopération de différents systèmes indépendants (effet de synergie). Par exemple, des systèmes experts multiples avec une expertise différente, mais avec chevauchement possible, peuvent coopérer pour résoudre certains problèmes en dehors de la compétence d'un système seul.

2.2.2 Problématique

Bond et Gasser [Bond et Gasser, 88] ont spécifié six classes de problèmes essentiels que les systèmes actuels d'IAD ont commencé à aborder et qui apparaissent dans tous les domaines d'application :

- Comment formuler, décrire, décomposer, allouer des problèmes et synthétiser les résultats parmi un groupe d'agents intelligents.
- Comment permettre aux agents de communiquer et d'interagir : quels langages ou protocoles de communication utiliser, que et quand communiquer.

- Comment s'assurer que les agents agissent de manière cohérente dans la phase de prise de décision ou d'exécution d'actions en accommodant les effets globaux des décisions locales et en évitant les interactions nuisibles.
- Comment s'assurer que les agents individuels raisonnent en fonction des actions, des plans, et de la connaissance des autres agents afin de se coordonner ; comment raisonner sur l'état de leur processus de coordination.
- Comment reconnaître et réconcilier des points de vue dispersés et des intentions conflictuelles parmi une collection d'agents qui essayent de coordonner leurs actions ; comment synthétiser vues et résultats.
- Comment construire des systèmes d'IAD pratiques ; comment créer des plates-formes et des méthodologies de développement pour l'IAD.

2.3 Le Concept Agent

Le domaine de l'IAD étant relativement nouveau, les définitions données sont utilisées dans un sens très large dans la littérature. Il manque donc une unification des définitions et une formalisation rigoureuse reconnue par l'ensemble de la communauté scientifique.

Les définitions suivantes s'efforcent d'intégrer les notions nécessaires pour satisfaire à la problématique de l'IAD, et présentent l'intérêt de ne faire référence à aucun concept (d'implémentation) informatique :

« Un agent est une entité intelligente, agissant rationnellement et intentionnellement, en fonction de ses buts propres et de l'état actuel de sa connaissance ». [Demazeau et Müller 90]

« On appelle agent une entité réelle ou abstraite qui est capable d'agir sur elle même et sur son environnement, qui dispose d'une représentation partielle de cet environnement, qui, dans un environnement multi-agent, peut communiquer avec d'autres agents, et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de sa connaissance, et des interactions avec les autres agents ». [Ferber, 89]

« Un agent est toute entité active dont le comportement est utilement décrit à l'aide de notions mentales telles que les connaissances, les buts, les intentions,... » [Lespérance 95].

Le comportement des agents est fondé sur des connaissances données a priori ou des connaissances « acquises » par apprentissage. Les agents ayant pour objectif de simuler des comportements autonomes, doivent avoir deux types de tendance [Erceau et Ferber, 91] :

✓une tendance « sociale », tournée vers la collectivité, qui définit les mécanismes et les connaissances nécessaires pour l'intégration de l'agent dans les activités d'un groupe, ce qui se traduit, entre autres, par des protocoles de **communication**.

✓une tendance « individuelle » qui définit le fonctionnement interne de l'agent. En général, nous pouvons considérer que les agents doivent avoir une structure qui leur permettra d'assurer trois fonctions principales : **percevoir, décider, et agir**.

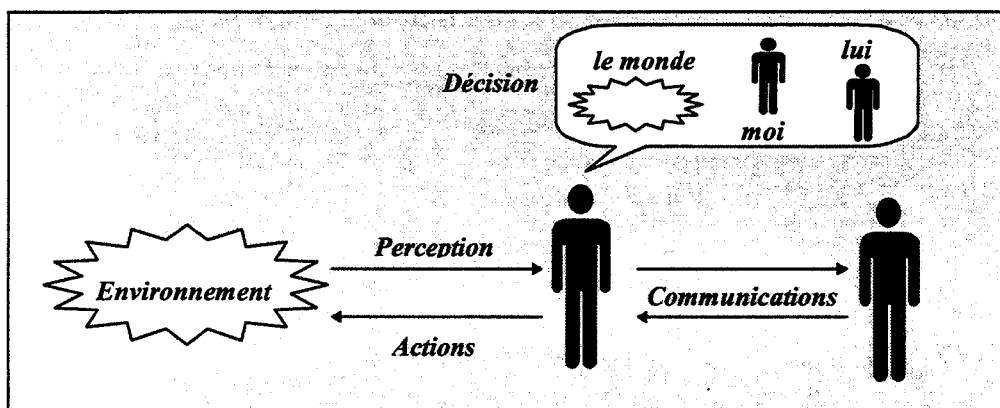


Figure III.1 « Le Concept d'Agent »

A partir de ces définitions nous allons présenter en détail le concept de Système Multi-Agents, et spécifier ainsi les comportements d'un ensemble d'agents dans une organisation sociale.

3 LES SYSTEMES MULTI-AGENTS (SMA)

L'étude des SMA permet de représenter le comportement de communautés d'agents « intelligents » en société. Pour cela, il faut tout d'abord définir les différents types d'agent et leur organisation dans le système.

3.1 Classification

On peut classer les systèmes multi-agents suivant de nombreux critères : capacité de raisonnement de chaque agent, nombre d'agents en interaction, mécanismes d'interaction et types de communications, organisation et contrôle, représentation de l'environnement et des autres agents, capacité d'apprentissage des agents, etc.

Les spécialistes de l'IAD proposent deux approches quant au degré d'« intelligence » à accorder aux agents :

3.1.1 Agents Cognitifs

Certains sont partisans d'agents complexes (« coarse grain »), ayant un certain nombre de croyances vis-à-vis de la société. Cette approche, qui considère que l'intelligence de la société est issue de la coopération entre intelligences individuelles, peut être baptisée approche sociale. On parle alors d'agents « cognitifs ». Cette vision est fondée sur la coopération d'agents déjà capables, à eux seuls, de réaliser des opérations relativement complexes.

Cette approche est à l'origine d'un certain nombre de réflexions qui constitue actuellement d'importants domaines de recherche :

- Les problèmes de connaissance et de croyance des agents : Quel est le niveau de connaissance que doit avoir un agent sur le comportement du reste de la société (fonctions, niveaux de responsabilité, taux d'activité, motivations des autres agents, etc.).
- Gestion des interactions entre agents : processus de négociation, résolution de conflits, prise de décision en commun, etc.
- Conception d'agents complexes autonomes : on réutilise les principes de l'IA classique (logique, révision de raisonnement, etc.) que l'on adapte. On obtient ainsi un ensemble d'agents, spécialistes de leur domaine, coopérant pour élaborer une solution satisfaisante.

3.1.2 Agents Réactifs

D'autres spécialistes préconisent au contraire de très petits agents (« fine grain »), n'ayant aucune intelligence, disposant simplement de comportements prédéfinis et qui sont activés par le biais de « stimuli ». On suppose alors que l'intelligence de la société émergera des interactions entre les agents la constituant. C'est l'approche biologique des systèmes multi-agent et les agents sont dits « agents réactifs ».

Un certain nombre de recherches sont également menées sur ce domaine :

- **Expérience-Emergence de comportement** : on essaie de caractériser le comportement d'une société d'agents, dont on ne connaît que les réactions élémentaires, en « regardant ce qui se passe ».
- **Eco-résolution** : le mécanisme de l'éco-résolution a été initié par [Ferber, 89]. *« Il consiste à définir une population d'agents dont le comportement permet d'atteindre par effet de bord un état, généralement stable, que l'on appelle solution du problème. Chaque agent répond aux principes d'autonomie et de localité »* [Ghedira et Verfaillie 92]. De nombreuses recherches se poursuivent sur ce sujet, notamment pour trouver des méthodes d'optimisation plus performantes, tout en garantissant la terminaison de l'algorithme.
- **Approche connexionniste** : cette approche, basée sur les réseaux neuronaux, qui pousse la logique d'agents très petits à l'extrême, est loin d'être récente, puisqu'elle date de 1943, avec le mathématicien Pitts et le neurophysiologiste Mac Culloch. Elle a connu un essor récent avec le développement du modèle de Hopfield [Hopfield, 82].

3.1.3 Différences entre Agents Réactifs et Agents Cognitifs

La frontière entre les deux points de vue n'est pas franche. On peut construire des agents qui s'activent pour un état particulier de l'environnement (stimulus) et qui peuvent agir rationnellement pour atteindre un but fixé lorsque les contraintes temporelles sont plus relâchées ; Vina & al [Vina et al. 91] parlent alors indistinctement de « reactiv agents » ou de

« knowledge-based controllers ». Il semble que du concept d'agents réactifs ne puisse pas émerger un comportement permettant de résoudre des tâches complexes ; mais ces agents pourraient fort bien constituer une couche de bas niveau pour les fonctions de perception et d'action des agents cognitifs.

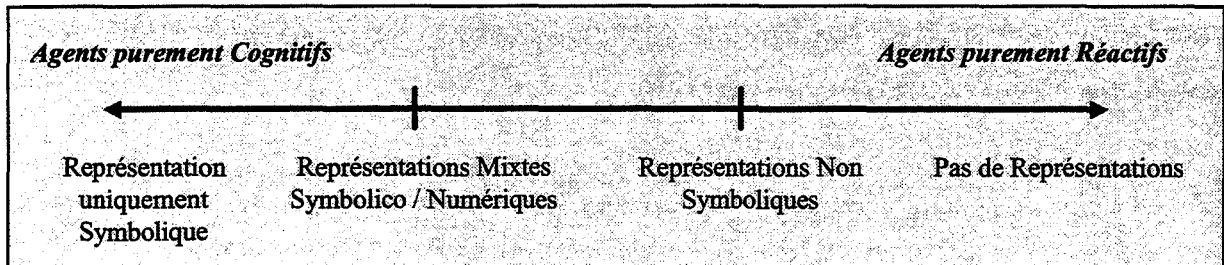


Figure III.2 « Une Typologie d'Agents »

Dans la majorité des systèmes réalisés ou proposés, la dichotomie entre cognitif et réactif disparaît, remplacée par des applications mixtes ou hybrides. Cette observation a conduit à penser que les deux écoles qui paraissaient contradictoires à l'origine n'étaient peut-être que les deux extrémités d'une droite (fig. III.2) [Ferber, 94] sur laquelle un agent donné se place en fonction de la relation qu'il entretient avec le monde dans lequel il évolue.

Que les agents s'apparentent peu ou prou à la famille réactive ou à la famille cognitive, la réalisation d'un système multi-agents pose deux questions fondamentales :

❶ *comment organiser le système ?* ou comment organiser la distribution des tâches selon les agents et le contrôle de la résolution globale du problème ? Il n'existe pas de théories de l'organisation qui permettent de décider, en fonction de l'application, quelle forme d'organisation, quelles interactions entre agents, ... adopter.

❷ *comment faire communiquer et interagir les agents entre eux ?* ou quels types de communication, de protocoles ou de langages utiliser ?, comment gérer les synchronisations et la cohérence des informations qui circulent entre les agents ?

Nous allons tenter, dans un premier temps, de répondre à la première question en présentant différents points de vue concernant les aspects organisationnels des sociétés d'agents.

3.2 Organisation des Agents

« Du point de vue de la réflexion sur la distribution des tâches, et de l'interaction cohérente entre les agents dans la résolution de problèmes distribués ou dans un système multi-agents, le problème de base est une question d'organisation, à savoir, décider quel agent fera quoi et quand. » [Gasser, 91]

« Toute la problématique des systèmes multi-agents se situe au carrefour des notions d'agents et de sociétés, ou si l'on préfère, de la relation entre les comportements individuels et les phénomènes observés au niveau global. C'est ainsi que dans la dialectique de l'individu et du groupe les notions de coopération, conflits, collaboration et coordination d'actions prendront tout leur sens. » [Ferber, 94].

« La structure d'une organisation peut être simplement définie comme la somme totale des moyens employés pour diviser le travail en tâches distinctes et pour ensuite assurer la coordination nécessaire entre ces tâches. » [Mintzberg, 79]

Avant d'aller plus en avant dans cette problématique, nous devons essayer de circonscrire ce que l'on entend par organisation. Comme le définit J. Ferber [Ferber, 94] dans ses travaux sur la *Kénétique*, on peut distinguer trois niveaux d'organisation dans les systèmes multi-agents :

① le niveau *micro-social*, où l'on s'intéresse essentiellement aux interactions entre agents, et aux différentes formes de liaisons qui s'expriment entre deux ou un petit nombre d'agents.

② le niveau des *groupes partiels*, où l'on s'intéresse aux structures intermédiaires qui interviennent dans la composition d'une organisation plus complète. A ce niveau on étudie les différenciations des rôles et des activités des agents, l'émergence de petites structures organisatrices entre agents, et le problème général de l'agrégation des agents lors de la constitution d'organisations.

③ le niveau des *sociétés globales* (ou populations) où l'intérêt repose surtout sur la dynamique d'un grand nombre d'agents, et sur la structure générale et son évolution. A ce niveau, les organisations multi-agents sont considérées comme des systèmes régulés.

Une société ne peut se réduire à une juxtaposition d'agents isolés, dotés uniquement de compétences sur un domaine. Elle est nécessairement munie de connaissances pour coordonner des actions ou résoudre collectivement des problèmes, pour orchestrer les échanges inter-agents.

Dans un monde inorganisé, les agents peuvent interagir indirectement par actions individuelles sur l'environnement. C'est la perception des modifications de cet environnement qui entraîne des réactions de la part des autres agents. On retrouve les interactions par perception pour modéliser des sociétés d'insectes. Dans le stade suivant de l'organisation, les agents agissent directement sur les autres agents pour atteindre leurs objectifs individuels. Ils opèrent d'après leurs croyances sur les compétences des autres.

Nous nous situons, par rapport à notre contexte de systèmes industriels, dans le second niveau d'organisation qui est plus élaboré et donc plus difficile à réaliser. Les agents agissent et interagissent d'après des conventions collectives. Ils opèrent dans le cadre d'une société et cette société n'existe que parce que les agents qui la constituent sont organisés. Les structures organisationnelles apparaissent alors comme essentielles : la conception d'un système multi-agents demande de définir non seulement la topologie initiale du groupe mais aussi de permettre les réorganisations nécessaires pour s'adapter au milieu extérieur et pour comprendre et répondre au mieux aux stimuli externes.

3.2.1 Les niveaux d'organisation des sociétés d'agents

Différents niveaux d'organisation ont été proposés pour permettre aux agents d'interagir, la majorité s'appuyant sur des modèles d'organisations humaines. Suivant le régime de contrôle et les relations entre agents, l'organisation peut être [Moraitis, 94] :

- une hiérarchie simple (organisation centralisée) qui garantit une interconnexion minimale entre agents.
- une hiérarchie uniforme (structure d'autorité) où la prise de décision est répartie sur plusieurs niveaux, afin d'éviter une saturation s'il y a trop d'informations à traiter. Les agents du niveau

le plus bas satisfont les requêtes des agents du niveau supérieur, eux-mêmes dépendent de ceux d'un niveau hiérarchiquement supérieur, etc.

- une organisation de type « marché » : le contrôle est distribué dynamiquement en fonction de l'offre et de la demande. Dans le modèle de réseau contractuel [Smith, 80], les agents sont en compétition pour obtenir certaines ressources et traiter un contrat.
- une communauté avec des règles de comportement : une organisation peut être construite plus comme un ensemble de règles de comportement localement interprétées, que comme une structure définie extérieurement. Ainsi dans le système PIP6 de Lenat [Lenat, 75] la connaissance est organisée comme une communauté d'agents interagissant (des êtres, «beings») par opposition à un groupe de structures organisées hiérarchiquement. Un système de ce type est une organisation « plate » de spécialistes, qui inclut un spécialiste « décideur » (chooser) pour la résolution des conflits. Chaque agent de la communauté a la même structure, les règles de comportement étant dérivées de la structure commune des agents. Les agents peuvent interagir en posant des questions sur les aspects particuliers des structures des autres agents.

M.S. Fox, dans sa décomposition en niveaux d'organisation, ajoute aux organisations précédentes la hiérarchie multi-divisionnelle et l'organisation collective [Fox, 81]. Dans la hiérarchie multi-divisionnelle, chaque division est un secteur de production qui contrôle sa stratégie pour élaborer un produit. Dans l'organisation collective, la hiérarchie est divisée en sous-organisations qui coopèrent pour atteindre un but et partagent des contrats à long terme.

Les sociétés d'agents peuvent reposer sur une ou plusieurs de ces organisations, les agents interagissant plus en se communiquant des informations, que par perception de l'environnement. Pour modéliser les liens inter-agents une solution est alors d'utiliser des connaissances sociales, c'est-à-dire des connaissances sur la structure de la société. Les connaissances d'acointances sont un cas particulier de ce type de connaissances : elles renseignent un agent sur l'existence et les compétences d'autres agents.

3.2.2 Les structures organisationnelles

L'identification de structures est une technique fondamentale de l'informatique traditionnelle. Dans le contexte de la coopération, elle conduit à la définition de structures représentant la connaissance organisationnelle. Trois structures représentent bien les travaux réalisés en IAD : le réseau contractuel [Smith, 80], le treillis de production [Gasser, 91], et le plan global partiel [Durfee et al 89].

- *Le réseau contractuel* : est un modèle informatique du protocole d'appel d'offres qui est utilisé dans les organisations humaines. Ce protocole constitue une solution au problème de connexion, qui consiste à allouer des tâches aux agents les plus appropriés. Il s'applique aux environnements où le contrôle et les données sont logiquement, et souvent géographiquement, distribués. Son principe est le suivant : un agent demandeur indique à ses accointances qu'il y a une tâche à effectuer. Ces dernières lui renvoient leur disponibilité, ce qui permet au demandeur de choisir l'agent qui va effectivement faire la tâche. L'agent choisi renvoie un acquittement d'acceptation ou non de la tâche, et avertit le demandeur lorsque la tâche est terminée.

- *Le treillis de production* : d'une façon générale, l'organisation représente l'ensemble des connaissances et interrogations qu'ont les agents sur les croyances et les actions des autres agents. Ces connaissances désignent des problèmes auxquels des éléments de solution ont déjà été apportés. Elles peuvent être définies initialement par l'utilisateur, ou acquises pendant la résolution. Elles peuvent également être reconsidérées par les agents en cours de résolution auquel cas elles sont transformées en interrogations ouvertes.

Modifier l'organisation revient à fixer ou à ouvrir de nouvelles interrogations. Ces interrogations contraignent les actions des agents et produisent un ensemble de points fixes ou de routines qui peuvent être utilisés pour la coordination.

- *Le plan partiellement global* : l'objectif est de combiner de façon unifiée les différentes techniques de coordination : le passage de contrat, le partage de résultat, l'organisation et la planification. Un système est proposé par Durfee et Lesser (DVMT) dans lequel ces différentes

techniques de coordination sont couplées. L'architecture générale de DVMT est basée sur des tableaux noirs. Une présentation et des réflexions sur cette architecture sont données dans [Laasri et Maitre, 89].

3.3 La Coopération

Dans notre thèse l'organisation est considérée, tout comme la communication, d'un point de vue pragmatique ; elle est supposée servir à la mise en oeuvre de la coopération.

Si la communication s'avère nécessaire à la coopération dans les environnements évolutifs comprenant des situations imprévisibles ou non conformes à un plan [March et Simon, 74], elle ne suffit pas pour autant à la mise en oeuvre de la coopération. Plus généralement, elle ne permet pas de décrire les relations entre les agents et de décider quel agent fait quoi, quand et avec qui. Une alternative consiste à incorporer ces processus de décision dans les programmes déterminant les comportements des agents, mais cette approche n'est pas générique car elle est dépendante du domaine d'application. Il est donc nécessaire d'abstraire les processus de coopération du domaine d'application et d'en donner une représentation explicite sur laquelle les agents puissent agir.

3.3.1 Processus de Coopération

Les processus de coopération entre agents en fonction de la tâche à résoudre peuvent être définis **statiquement** à la conception du système ou **dynamiquement** en fonction de l'**évolution** du système [Davis et Smith, 83]. La première solution est efficace et convient à la résolution de problèmes bien formalisés. En revanche, la deuxième solution s'adaptera à des situations imprévues, l'organisation pourra être réactualisée et disparaître en fonction de l'environnement (planification et négociation dynamique, capacité d'auto-organisation, émergence de comportement collectif).

Pour résoudre un problème, la coopération entre agents, qu'ils soient cognitifs ou réactifs, est essentielle et peut être définie sur un large spectre allant de la coopération totale à l'opposition complète. La coopération entre agents cognitifs est nécessairement plus complexe que celle

entre agents réactifs. Nous nous intéressons principalement à celle-ci où deux techniques sont particulièrement utilisées :

❶ *La répartition des tâches* : c'est une forme de coopération dans laquelle les agents s'entraident en partageant la charge des sous tâches issues de la tâche initiale (le problème ou le but initial). On dit alors que le contrôle est dirigé par le but. En effet, les agents tentent de résoudre des sous-buts dont les résultats sont intégrés pour donner la solution au but final. La coopération se déroule en trois étapes : tout d'abord, le problème est décomposé en un ensemble de sous tâches, puis celles-ci sont distribuées aux différents agents (en fonction de leur compétence). Cette mission de décomposition et de répartition peut être effectuée par un agent cognitif. Enfin, les résultats obtenus sont intégrés pour former la solution du problème. Cette solution peut être partielle ; il faut alors recommencer, selon un processus itératif.

Le partage des tâches est utilisé pour former une structure explicite de connexions tâches/sous-tâches entre les agents. La hiérarchie qui en résulte donne un moyen efficace pour construire la solution. Mais le partage de tâches nécessite de pouvoir décomposer le système initial en un ensemble de sous problèmes pouvant être traités de façon indépendante et avec un minimum de communications entre agents. Ce type de coopération semble particulièrement adapté pour des domaines où il existe une hiérarchie de tâches ou de niveaux d'abstraction. Dans le cas où une telle indépendance des sous-problèmes n'existe pas il faut procéder par partage de résultats.

❷ *Le partage de résultats* : le partage de résultats est une forme de coopération dans laquelle les agents s'entraident en partageant les résultats partiels. On dit alors que le contrôle est dirigé par les données.

La résolution par partage de résultats se décompose en trois phases. Dans un premier temps, l'ensemble des données initiales du problème est communiqué aux agents concernés. Après une phase de résolution, les résultats partiels sont regroupés puis synthétisés par un agent. Cette synthèse produit de nouvelles connaissances qui peuvent constituer une solution au problème. Dans le cas contraire, on recommence le processus en distribuant ces nouvelles connaissances.

Il apparaît ici que le partage de résultats n'exige pas de mécanismes de décomposition. Cette méthode est particulièrement utile dans des domaines où les résultats obtenus par un agent influencent ou contraignent fortement ceux des autres agents du modèle.

3.3.2 La Négociation

Dans les systèmes multi-agents l'une des préoccupations majeures consiste à coordonner les actions des agents, d'où la nécessité d'établir des protocoles de négociation.

Une négociation est pertinente si elle est susceptible de faire progresser l'état de la résolution d'un problème. Nous pouvons distinguer deux cas de figures : le cas où les agents essaient de regrouper leurs hypothèses (connaissances issues d'un raisonnement pour la résolution d'un problème) en prouvant leur compatibilité. Le deuxième cas relève d'une situation conflictuelle. Un conflit apparaît lorsque deux agents ont des hypothèses contradictoires sur une partie de problème commune. La négociation a donc pour but d'éliminer une des deux hypothèses.

Le type de négociation ou stratégie de négociation varie en fonction du type des agents concernés. Les différentes négociations possibles peuvent être classées en stratégies de médiation, d'évaluation, d'argumentation, et d'application de règles de haut niveau en cas de persistance des conflits [Vignal, 94]. Nous allons détailler chacune d'entre elles :

- *Médiation* : cela consiste à créer un agent médiateur qui apporte une connaissance supplémentaire.
- *Evaluation* : l'évaluation est utilisée dans la négociation entre deux agents conflictuels. Cela revient à associer des valeurs numériques à certaines hypothèses, et à se servir de ces valeurs dans le cadre de conflits.
- *Argumentation* : ce type de négociation repose sur des capacités explicatives associées aux agents. Ces capacités peuvent se traduire par l'interrogation d'un module externe d'argumentation qui préciserait les aboutissants de choix d'hypothèses en les simulant.

- *Règles de haut niveau* : si le conflit n'a pu être résolu par aucune des stratégies précédentes, la négociation échoue. On va donc se servir de règles de méta-niveau. Cela consiste à associer des heuristiques gérant les hypothèses en cas de conflits, avec possibilités d'associer des solutions alternatives.

3.3.3 Le Contrôle

L'objectif d'un mécanisme de contrôle est : d'une part de repérer quels agents sont, en fonction de l'évolution de la résolution, capables de participer avec succès à l'élaboration du résultat final et disposés à le faire, et d'autre part de maintenir la cohérence de la résolution.

Ce mécanisme peut être de deux types :

- **décentralisé**, dans le sens où chaque agent dispose d'une vue partielle du déroulement de la résolution (principe de rationalité limitée) et d'une autonomie lui permettant de raisonner et de communiquer avec d'autres agents. Dans ce cas, la multiplicité des points de vue impose la notion de **négociation** pour aboutir à une solution [Hewitt, 91].
- **centralisé** : dans ce cas chaque agent possède une vue globale des capacités de chacun et de l'avancée du problème.

Dans la pratique, les concepteurs de systèmes vont choisir une stratégie de contrôle appropriée à l'application, préservant la liberté d'action et l'indépendance de chaque agent, et la cohérence de l'ensemble.

De la description des techniques de coopération et de négociation, il découle que deux fonctions de contrôle doivent être mises en place. La première prend en charge le contrôle du réseau et s'occupe d'attribuer des tâches et des responsabilités aux agents. La seconde est un contrôle local : chaque agent décide quelles tâches il doit exécuter en priorité.

Comme il est pratiquement impossible de mettre en place un contrôle global [Camarata, 83], certains auteurs [Durfee et al. 89] ont développé un mécanisme de contrôle local. Son rôle est triple : tout d'abord, il fournit une organisation du réseau dans laquelle chaque agent remplit un certain nombre de tâches spécifiques. Il dote tous les agents d'un ordonnanceur qui établit une séquence d'actions de résolutions basée sur l'état du réseau. Enfin, il établit un niveau de méta-communication sur le degré de résolution locale du problème qui permet aux agents de raffiner dynamiquement leur organisation. La méthode la plus classique dans le cas de négociations est l'appel d'offre. Le modèle de Réseau Contractuel [Smith, 80] est basé sur cette approche.

Nous verrons dans le paragraphe suivant, concernant les modes de communication, les mécanismes de contrôles associés aux systèmes de « tableaux noir » et aux langages d'acteurs.

3. 4 La Communication

« Les communications, dans les systèmes multi-agents comme chez les humains, sont à la base des interactions et de l'organisation sociale. Sans communication, l'agent n'est qu'un individu isolé, sourd et muet aux autres agents, refermé sur sa boucle perception-délibération-action. C'est grâce aux communications qui permettent la coopération et la réalisation de tâches en commun, que les agents deviennent véritablement des êtres sociaux. » [Ferber, 93].

« Au delà des questions liées aux langages, aux conventions communicationnelles et aux protocoles, le problème intéressant ici est une modélisation d'un acte de communication en tant qu'action modifiant l'état du monde, en l'occurrence l'état interne d'autres agents. Une telle représentation doit permettre une planification en fonction d'actes communicationnels : informations, requêtes, interrogations. La réception d'un message par un agent doit conduire de sa part à une déduction du but recherché par l'expéditeur du message, et éventuellement à une reconnaissance de son plan. » [Ferber et Ghallab, 88].

Pour les agents coopérer exige également de communiquer, et donc une modélisation de la communication en tant qu'acte planifiable. Dans certains cas les effets d'une communication

sont prévisibles (informer sur l'utilisation d'une ressource, annuler une requête pour la réalisation d'une tâche), dans d'autres ils ne le sont pas. Au même titre qu'une action de perception, une action de communication ne pourra intervenir que dans un plan partiel.

Les agents ne communiquent pas sans raison : toutes leurs actions sont intentionnelles, c'est-à-dire dirigées vers l'accomplissement d'objectifs. Il en est de même des envois de messages qui sont le fruit d'une volonté. On peut alors comprendre les intentions de l'interlocuteur, savoir pourquoi il a posé telle ou telle question. Cette technique repose sur une taxonomie des différents types d'actes de langages et sur la possibilité de donner des lois concernant la structure des communications. Par exemple, un ordre doit être suivi d'une acceptation ou d'un refus, ou bien d'une demande de confirmation, ou d'une demande de précisions supplémentaires.

Il y a deux types de connaissances nécessaires aux agents pour communiquer et coopérer :

- celles qui se rattachent directement au mode particulier de communication (par envoi de message, ou par le biais d'un tableau noir),
- celles qui se rattachent à la situation d'un agent dans un univers multi-agents, quel que soit le mode de coopération. Elles concernent la représentation des autres agents, la représentation et le raisonnement sur le temps, et la théorie de l'action et du temps.

3.4.1 Les Modes de Communication

Les procédures de communication pour véhiculer les interactions entre agents, sont essentielles en IAD et deux grands mécanismes sont proposés : la communication par envoi de messages et la communication par partage d'informations. Des travaux de recherche basés pour la plupart sur la théorie des actes de langages se poursuivent actuellement pour définir des modèles de communication [Bouron, 93], [Shoham, 93], [Finin et al. 94].

3.4.1.1 Communication par partage d'informations

C'est historiquement, le premier modèle de communication qui est apparu au début des années 60 [Newell, 62]. Le parangon des structures centralisées est le « tableau noir » [Hayes-Roth 85], où la mémoire partagée est vue comme un tableau sur lequel les agents écrivent, trouvent des réponses partielles, des informations. Le tableau noir est divisé en niveaux. Les agents travaillant à un niveau particulier d'abstraction ont accès à un niveau correspondant dans le tableau. Un dispositif de contrôle gère les conflits d'accès au tableau, les agents faisant les demandes d'accès de manière autonome.

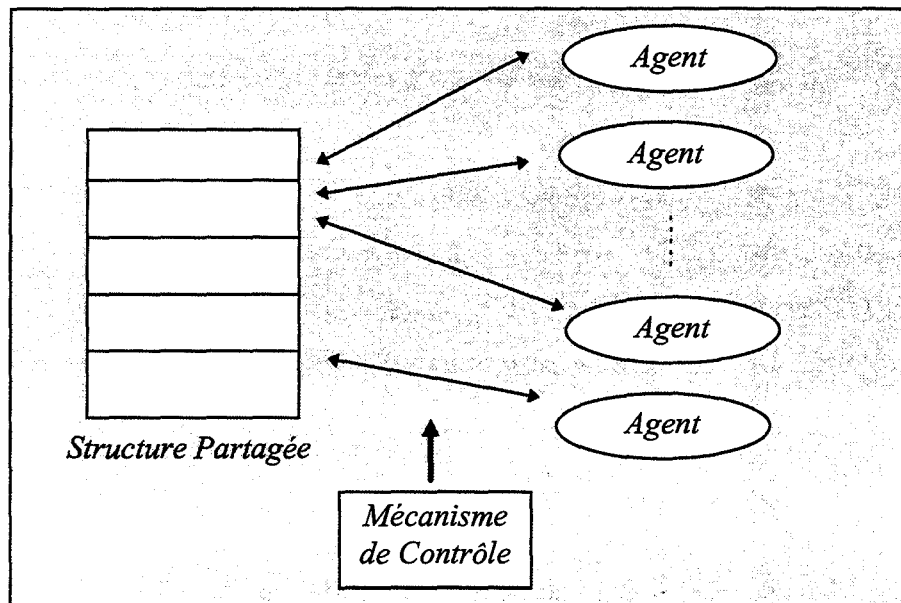


Figure III.3 « Communication par Partage d'Informations »

« Le modèle de blackboard propose une solution incrémentale et opportuniste d'un problème ... Il permet d'étudier un problème à plusieurs niveaux d'abstraction et nécessite la coopération de plusieurs expertises hétérogènes qui ont une vue partielle du problème global et représentent chacune une partie de la connaissance du domaine » [Ayl, 91].

Le mécanisme de blackboard [Nii, 86] est constitué de trois éléments principaux :

① *Les Sources de Connaissances (Knowledge Sources)* : la connaissance du domaine nécessaire pour la résolution du problème est partagée entre plusieurs modules appelés sources de connaissances (SC) ; leur objectif est de contribuer à la résolution du problème global en résolvant une partie de celui-ci. Pour cela, les SC se partagent la base de données commune, le blackboard, et sont constituées d'une partie **condition** qui définit les conditions qui doivent exister dans le blackboard avant leur activation, et d'une partie **action** qui définit leur contribution après activation.

② *Le blackboard* : le blackboard contient une description de l'état de la résolution sous formes d'entités appelées souvent faits, hypothèses ou noeuds. Il est organisé sous forme de niveaux qui permettent une décomposition de la description de la solution en niveaux d'abstraction.

③ *Le Contrôle* : le mécanisme de contrôle a pour rôle de choisir, parmi les sources de connaissances dont la partie condition est vérifiée, celle dont la partie action sera exécutée, créant ainsi de nouvelles hypothèses dans le blackboard et permettant à la résolution de se poursuivre. L'aide au choix des SC à activer se fera par le biais d'« événements ». Ces événements sont engendrés par la création ou la mise à jour d'une hypothèse dans le blackboard. Ils sont placés dans une liste qui sera traitée par le mécanisme de contrôle.

Sur les modèles à base de tableaux noir, divers types de contrôle peuvent être envisagés : procédural (Hearsey II [Lesser et Erman, 78], DVMT [Lesser et Corkill, 88]), hiérarchique (Crysalis [Terry, 83]), à base de tableaux noir (BB1 [Hayes-Roth, 85]), ou hybride (Atome [Laâsri et al, 88]) une étude détaillée de ces différents mécanismes est décrite dans [Moraitis, 94].

Le principal inconvénient de ce modèle est l'aspect centralisateur du tableau noir, qui va à l'encontre de l'approche distribuée des SMA, d'où les nombreux travaux sur les systèmes à base de tableaux noirs parallèles ou distribués. La principale justification de l'utilisation de structures tableau noir est souvent la meilleure maîtrise des processus, tant au niveau de la formalisation des connaissances que de la mise au point informatique (en particulier pour la garantie de la cohérence des données).

3.4.1.2 Communication par envoi de messages

Si les agents communiquent par envoi de messages ils se rapprochent du modèle d'**acteur** proposé par Hewitt [Hewitt, 77]. Ce premier modèle définissait un acteur comme une entité active et autonome qui a une vue partielle de l'univers. Cet acteur était décrit au moyen de deux éléments : des « **accointances** » (qui correspondent aux acteurs connus d'un autre acteur), et un « **comportement** » décrit par un « **script** », ensemble de méthodes qui indiquent les différentes actions que peut accomplir cet acteur en réponse aux messages qu'il reçoit.

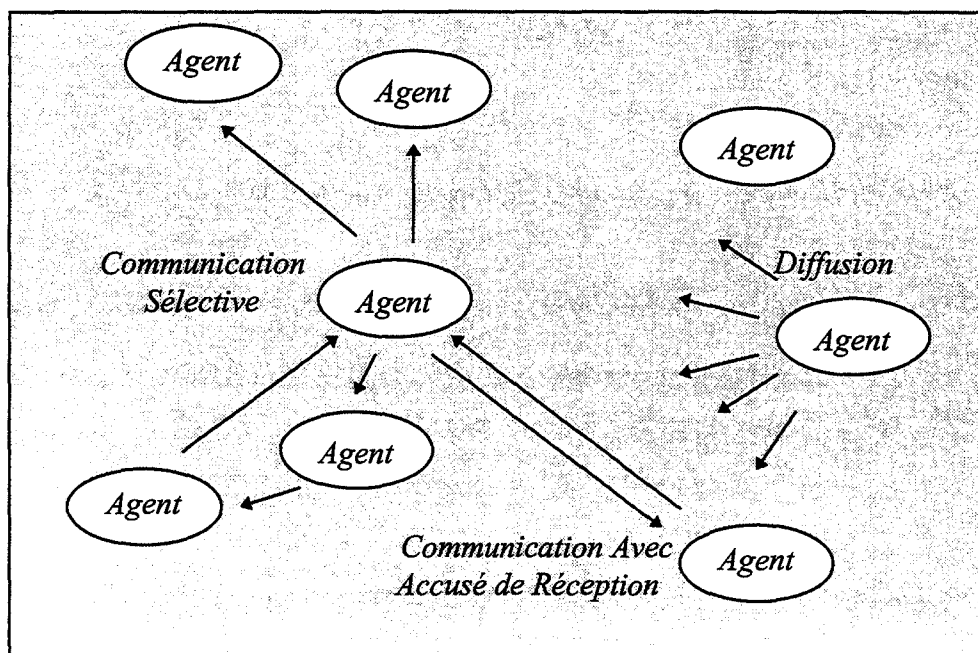


Figure III.4 « Communication par Envoi de Messages »

L'acteur pourra adopter différents comportements pour répondre à un message : soit il le traite, soit il délègue la tâche à ses accointances ; il peut également créer de nouveaux acteurs puis disparaître. L'envoi de messages est le seul mode de communication entre acteurs. Tous les messages sont **asynchrones** et placés dans une mémoire-tampon (sans attente de réponse). Chaque message contient une **continuation**, à qui doit être retournée la réponse à la requête. Il y a *distribution des connaissances* : chaque acteur possède un comportement réparti entre ses accointances ; et *distribution du contrôle* : chaque acteur possède un **script** qui définit sa réaction aux messages qu'il reçoit.

Plusieurs langages d'acteurs ont été développés à partir de ces travaux fondateurs : ABCL, PLASMA-II, ACTALK, MERING IV, etc. Ils s'appuient sur les principes suivants [Carle, 92]:

- *le calcul parallèle* : tous les calculs sont réalisés a priori de manière concurrente.
- *la communication par messages asynchrones* : l'envoi de message est le seul mode d'interaction entre les acteurs. Tous les messages sont asynchrones et placés dans une mémoire-tampon sans attente de réponse, mais avec passage d'une **continuation** (à qui doit être retournée la réponse à la requête) en argument.
- *l'autonomie* : il n'existe pas de zone partagée par plusieurs acteurs.
- *l'aspect dynamique* : chaque acteur peut créer un certain nombre d'autres acteurs (le réseau de communication est reconfigurable).
- *la distributivité* : il y a une distribution des connaissances (chaque acteur possède un comportement particulier) et du contrôle (chaque acteur possède un script qui définit sa réaction aux messages qu'il reçoit).
- *la localité* : chaque acteur possède une vue partielle de l'univers. Il ne peut s'adresser directement qu'à ses propres accointances, c'est-à-dire aux acteurs dont il connaît l'adresse.
- *la garantie de livraison* : un message est assuré de parvenir à son destinataire.

Un système d'acteurs évolue dynamiquement par modification du comportement de chaque acteur et recomposition de la communauté. En effet, l'acteur pourra adopter différentes stratégies pour répondre aux messages qu'il reçoit : soit il les traite, soit il délègue la tâche à ses accointances, soit il crée un nouvel acteur pour les traiter, etc. Le modèle proposé par G. Agha [Agha, 86] constitue un exemple de modèle permettant cette plasticité d'un univers d'acteurs.

Ce modèle, structure un acteur en deux parties (fig. III.5) :

- une boîte aux lettres, dans laquelle s'accumulent les messages reçus par l'acteur. Ils seront traités de façon asynchrone dans l'ordre d'arrivée.
- un comportement, qui correspond aux actions entreprises par l'acteur pour traiter le message courant.

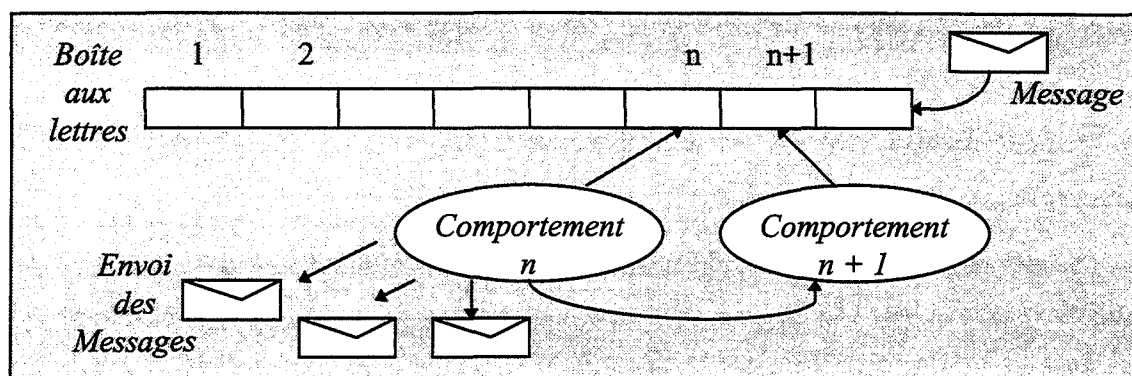


Figure III.5 « Le Modèle d'Acteur Proposé par G. Agha »

Agha fut le premier à introduire la notion de comportement de remplacement. Quand l'acteur effectue une action (déroulement de son script) en réponse à un message, son comportement n peut préciser un comportement de remplacement $n+1$ (fig. III.5) qu'il adoptera à la réception du message suivant. Ce nouveau comportement (comportement successeur) peut éventuellement commencer à fonctionner en parallèle.

Seuls les principes fondamentaux des langages d'acteurs ont été décrits ici. Une excellente bibliographie comparative des principaux langages d'acteurs figure dans [Carle, 92].

Plusieurs protocoles de communication sont possibles dans une communication par envoi de messages. Les décisions sur la façon dont les agents vont communiquer entre eux sont contraintes par la politique organisationnelle choisie ; plusieurs politiques sont proposées :

- ☒ communication sélective ou diffuse : les agents font-ils une distinction entre ceux avec qui ils vont communiquer et les autres ? si oui quels sont les critères pour choisir les destinataires ?
- ☒ communication non-sollicitée ou sur demande : sait-on qui veut communiquer avec qui ? la communication est-elle effectuée après demande d'informations ou après analyse des besoins informationnels des autres agents ?
- ☒ communication avec ou sans accusé de réception : le destinataire doit-il ou non indiquer à l'émetteur s'il a reçu l'information ?
- ☒ communication unique ou répétée : une information est-elle envoyée une ou plusieurs fois ? à quelle fréquence ?

Un agent coopérant par envoi de messages a besoin des connaissances suivantes [Ayel, 91] :

- connaissances sur ses propres capacités et possibilités, on parle alors de capacités d'introspection.
- connaissances sur les capacités et sur les possibilités des autres agents. Une meilleure connaissance des autres agents permet à un agent de limiter les échanges d'informations, de mieux répondre au besoin de coopérations de l'univers, et de mieux cibler ses actions de coopération avec les autres agents. Cette connaissance est gérée, comme une connaissance incertaine, par des systèmes de croyance.
- connaissances organisationnelles. S'il existe une structure organisationnelle de l'univers, chaque agent doit connaître sa place dans cette structure et le rôle et les responsabilités qui lui sont rattachés.
- connaissances pour communiquer. Pour communiquer les agents doivent disposer d'un langage et de protocoles de communication communs. Ces connaissances étant disponibles dans chaque agent.
- connaissances dynamiques sur l'état des autres agents. Un agent doit connaître l'état des autres agents au cours de la résolution. Il peut avoir besoin de savoir si un agent particulier est occupé ou non et quelles sont les ressources qu'il utilise.
- connaissances dynamiques sur les activités des autres agents. Un agent peut avoir besoin de connaître les activités courantes et futures d'autres agents et dans quelle intention elles se situent. Pour cela, il peut utiliser une logique des croyances lui permettant à la fois de raisonner sur ce qu'il croit des autres agents et sur ce qu'il sait de lui-même et des autres.

3.4.2 Prise en compte du temps

« La dimension temporelle d'un système évolutif multi-agents est essentielle. Contrairement aux autres ressources de l'univers le temps ne se partage pas entre agents mais se multiplie. Chaque nouvel agent dispose, le long de sa propre dimension temporelle, de la même quantité de temps que les autres. On a donc à gérer une multiplicité de temps relatifs dont la complexité exclut toute approche naïve. » [Ferber et Ghallab, 88].

Le contrôle du temps est indispensable pour régler :

❶ *les interactions entre agents : actions avec durées et recouvrements dans le temps, messages, coopérations, conflits,...* : le parallélisme de résolution des agents dans un univers multi-agents implique le choix d'une représentation du temps. En effet, un agent peut avoir à communiquer à un autre agent les actions qu'il a faites ou qu'il a l'intention de faire. Il est donc nécessaire qu'il les situe dans le temps d'une manière ou d'une autre et que l'agent récepteur soit capable de les situer dans sa propre échelle de temps.

Pour cela chaque agent utilise son horloge locale pour gérer le temps. Horloge qui doit être liée à une horloge universelle permettant de faire coïncider des événements simultanés associés à des agents différents. Le choix d'une représentation adéquate du temps est donc fondamental, et les formalismes logiques développés par la sémantique temporelle semblent particulièrement indiqués du fait de leurs grandes capacités expressives [Ferber et Ghallab, 88].

❷ *les interactions entre les agents et l'environnement : état des ressources, mise à jour des modifications provoquées par l'intervention des agents, événements imprévus,...* : lorsque l'on aborde les SMA, l'agent est très souvent décrit comme étant autonome et immergé dans son environnement. Cette définition, généralement admise, pose le problème des rapports entre un agent et son environnement physique. En effet, la vision statique qui suppose que le monde n'évolue pas lorsque l'agent raisonne, est simplificatrice et trop « irréaliste » car un grand nombre de problèmes se situent dans un environnement dynamique. Dès lors, de nombreuses interrogations apparaissent :

- *réactivité* : comment réagir face à un événement du monde imprévu ?
- *ponctualité* : comment assurer une réponse de qualité respectant une échéance ?
- *adaptativité* : comment intégrer des faits nouveaux indisponibles au début de la réflexion ?
- *sélectivité* : comment privilégier les actions et les hypothèses prioritaires ?
- *efficacité* : comment être suffisamment rapide pour fonctionner en temps réel ?

Pour répondre à ces deux types d'interactions, on s'aperçoit que résoudre un problème n'est pas forcément trouver la réponse ayant la meilleure qualité mais plutôt trouver la meilleure réponse possible au vu du laps de temps accordé. Pour cela, il est nécessaire d'introduire un nouveau paramètre aux agents que l'on définit : le temps.

Modéliser le temps revient à :

- Définir les propriétés temporelles de base du domaine (point ou intervalle, temps linéaire ou treillis,...) en fonction de l'application envisagée.
- Associer des informations temporelles aux objets du domaine pour représenter l'évolution.

L'une des possibilités est de représenter l'ensemble des actions que chaque agent doit effectuer, leurs effets prévus, les événements auxquels l'agent s'attend, et ses buts comme un graphe partiellement ordonné d'instantanés (points) ou d'intervalles. La gestion d'un tel graphe (un treillis des temps) consiste principalement à en assurer et maintenir la cohérence, au sens des relations temporelles qu'il traduit. Elle doit également permettre à l'agent de décider (a priori ou en cours d'exécution) d'un ordre linéaire dans lequel effectuer ses actions. Pour cela un agent doit tenir compte des délais dont il dispose, des ressources disponibles pour l'exécution des actions ainsi que de ses connaissances sur les actions que d'autres agents effectuent. La stratégie qu'il utilisera va dépendre du type d'attitude qu'il doit adopter vis à vis des autres agents (chercher à les gêner en cas d'hostilité, ou éviter de les gêner en cas de coopération). Son treillis des temps n'est qu'un sous graphe du treillis du groupe d'agents avec lesquels il interagit.

Diverses approches ont été proposées pour la gestion d'un treillis des temps. Elles ont donné lieu à des systèmes tels que [Allen, 84], IxTeT [Ghallab et Mounir, 89]. Ces systèmes, qui ont des fonctionnalités différentes, prennent en compte pour la plupart le parallélisme des actions, mais pas la dimension multi-agents. C'est là encore un domaine essentiel qui reste à approfondir.

De plus, la problématique associée à la simulation des systèmes de production (discretisation du temps) ajoute des contraintes particulières qui viennent se greffer à la dimension temporelle des systèmes multi-agents. Nous analyserons, dans les chapitres suivants, le type de solution que nous avons choisi par rapport à cette double problématique.

4 APPORTS AUX SYSTEMES INDUSTRIELS

Nous allons décrire dans cette partie la manière dont les systèmes multi-agents vont s'intégrer dans un processus d'étude comportementale d'organisations productives, et l'apport des techniques d'intelligence artificielle distribuée à la compréhension des phénomènes liés à la prise de décision et à l'organisation des acteurs constituant ces organisations.

4.1 Organisation productive et prise de décision distribuée

Comme nous l'avons vu dans le chapitre I, la réactivité des entreprises est liée à deux facteurs clefs : l'intégration et la flexibilité. La flexibilité, basée sur une plus grande autonomie de prise de décision des différents acteurs, entraîne une réorganisation de l'entreprise et une distribution de la décision aux différents niveaux.

Nous allons dans un premier temps préciser le concept de prise de décision distribuée : *« La prise de décision distribuée est caractérisée par l'absence d'un décideur central. Chaque décideur a un modèle d'une partie limitée du problème. La résolution du problème nécessite la coordination des efforts de chacun des acteurs, sans aucune possibilité pour eux d'arriver à une compréhension du problème dans sa globalité »* [Brehmer, 91].

La prise de décision distribuée présuppose un travail coopératif impliquant l'interaction d'objectifs multiples et divers, mais aussi d'heuristiques et de structures organisationnelles différentes [Shmidt, 91]. Cette distribution est imposée par la complexité des tâches et la nécessité, dans le contexte des organisations modernes de production par exemple, d'une décomposition dynamique en sous tâches. Mintzberg [Mintzberg, 79] considère que la décentralisation d'un système de prise de décision est due au fait qu'un seul centre, un seul cerveau, ne peut comprendre toutes les décisions. Les décisions doivent être prises là où les individus appréhendent pleinement la situation et peuvent y répondre intelligemment, c'est-à-dire là où est le savoir. La décentralisation de la décision permet à une organisation de répondre rapidement aux conditions locales en écourtant les temps de transmission d'informations, et de réduire les phénomènes de perturbations liés aux « bruits ».

La modélisation des problèmes de prises de décision distribuées, tels qu'ils sont définis par différentes théories : théorie des organisations, sciences cognitives, systémique, sociologie, psychologie, etc. peut servir de base pour déterminer les éléments nécessaires à la conception des systèmes multi-agents en général et plus précisément ceux destinés au domaine de la prise de décision.

4.2 De l'IAD à une vision méta-systémique de l'organisation

Dans les parties précédentes de ce chapitre nous avons vu que les développements actuels de la recherche en intelligence artificielle distribuée concernent les points suivants :

- la manière de diviser et de répartir la connaissance d'un problème sur un certain nombre d'entités distribuées et coopérantes.
- la manière de coordonner le comportement intelligent d'un ensemble d'entités selon des lois sociales, et de faire coopérer ces entités entre elles.
- l'étude de l'émergence de concepts nouveaux à partir d'interactions d'entités individuelles ayant un comportement autonome.

La problématique soulevée par les deux premiers points rejoint clairement les problèmes de coordination et de coopération au sein des organisations productives. En particulier, on trouvera en intelligence artificielle distribuée des questions sur la modélisation de la connaissance et sur sa répartition sur différentes entités, qui renvoient au partage de la connaissance en entreprise. Ainsi que des questions sur la gestion des conflits, le comportement social au sein d'un groupe, et le maintien de la cohérence des décisions et des plans d'action entre le local et le global, qui sont très proches de la problématique des organisations [Burlat, 96].

Le troisième point fait référence à la possibilité d'apparition de fonctionnalités globales qui n'ont pas été explicitement définies au niveau du système, et qui résultent d'interactions entre différents agents. Cette notion d'interaction entre entités autonomes est analysée par J. Ferber [Ferber, 94] comme : « *la structuration des systèmes complexes résulte de l'interaction entre entités relativement autonomes et indépendantes, (...) qui travaillent au sein de communautés selon des modes parfois complexes de coopération, conflit, concurrence pour survivre et se*

perpétuer ». Cette démarche, qui s'attache à l'étude de phénomènes émergents à partir d'actions individuelles qui concourent à l'élaboration de la structure d'une organisation, rejoint l'approche méta-systémique et la construction hiérarchique progressive d'une organisation en niveau d'intégration à partir des caractéristiques de ses constituants.

De plus, les différentes structures organisationnelles des sociétés d'agents et la hiérarchie de contrôle font qu'un agent de niveau supérieur agit comme un contrôleur qui assure la coordination des agents de niveau inférieur. Il possède en particulier des connaissances sur les connaissances des agents inférieurs, c'est-à-dire des métaconnaissances, et cet emboîtement nous renvoie à l'approche méta-systémique et à la construction d'une organisation par emboîtements successifs en méta-niveaux.

Le concept de système multi-agents, par son caractère méta-systémique et par l'importance qu'il accorde à l'autonomie des entités constituantes, semble donc approprié pour modéliser et observer le comportement d'une organisation productive.

4.3 Apports de l'IAD aux systèmes industriels

Plusieurs raisons peuvent amener à choisir une solution basée sur l'IAD pour résoudre des problèmes de prise de décision distribuée dans les systèmes industriels.

☞ *Du point de vue de la Modélisation* : un modèle doit être « valide » (fidèle à la réalité), nous allons donc décrire les différents apports de l'IAD, en terme de validité des modèles, à la modélisation des systèmes industriels.

- **Distributivité** : la plus grande partie des systèmes naturels sont naturellement distribués. Les individus qui travaillent sur un problème le font généralement en équipes, et il est toujours préférable de confronter des avis provenant de sources diverses pour la fiabilité de la décision finale. Il est donc avantageux de pouvoir reproduire cette réalité dans un modèle informatique permettant de gérer cette distribution. De même, la programmation d'un système fondé sur les techniques de l'IAD peut être ainsi plus facilement et rapidement réalisée puisqu'elle reproduit l'analyse de la réalité.

- **Structure Décisionnelle** : étant plus proche de la structure, un modèle respectant la distribution naturelle d'un système permet de bien séparer le processus physique de sa commande. Cela permet de respecter l'autonomie des entités décisionnelles concernées ; c'est à elles que reviennent les décisions finales les concernant, après une négociation dans laquelle elles ont pu intervenir avec leurs arguments propres.

- **Réactivité** : une résolution distribuée permet une meilleure réactivité du système, c'est-à-dire la prise en compte d'événements exceptionnels (pannes, arrivées de commandes imprévues, etc.), qui sont souvent négligés dans les systèmes de commandes centralisées du fait de leur complexité et des délais imposés.

- **Efficacité** : une approche de résolution centralisée n'est pas toujours possible. Certaines entités sont en effet susceptibles de ne pas pouvoir -ou ne pas vouloir- se conformer à un algorithme global d'optimisation. De plus, une trop grande combinatoire (systèmes complexes) peut conduire à un échec des solutions centralisées.

↪ *Du point de vue de la Simulation* : les apports de l'IAD à la simulation des systèmes industriels se situent à différents niveaux :

- **Décision** : la simulation telle qu'elle est généralement utilisée (dimensionnement et gestion des ressources) a montré ses limites en terme de gestion et de prise de décision. Aujourd'hui encore, la prise en compte de l'activité heuristique des décideurs dans les logiciels de simulation est pratiquement inexistante.

- **Apprentissage** : s'il peut être facile de comprendre une décision prise par un acteur de l'entreprise, il reste difficile de savoir comment il y est arrivé. Chaque décideur, quel que soit son niveau, possède sa propre façon de raisonner qui est influencée par l'environnement social dans lequel il évolue. La simulation de différents scénarios productiques peut permettre l'émergence d'un comportement collectif adapté à la problématique, et ceci par un processus d'apprentissage.

- **Résolution de Conflits** : le fait d'intégrer toutes les expertises où savoir faire sous forme d'agents autonomes permet d'avoir un feed-back en cas de conflits. L'interaction entre les différents agents joue un rôle prépondérant dans l'identification des dysfonctionnements liés à des problèmes de gestion et de prise de décision (peu étudiés en simulation).

- **Modularité** : le fait de décomposer un système en sous-systèmes permet un développement beaucoup plus facile. Pour les systèmes complexes, cela permet d'avoir une vue simplifiée et donc une plus grande lisibilité, ce qui facilite la validation du modèle. Chaque expertise faisant partie d'un sous-système peut être traitée séparément pour arriver à une construction modulaire.

- **Evolutivité** : les modifications apportées à un modèle distribué sont grandement facilitées par sa décomposition en modules. En effet, l'enrichissement d'un modèle est souvent le fait de parties bien précises, plus faciles à appréhender dans un système modulaire. C'est un point très important dans un contexte où les connaissances sont souvent mises à jour.

↳ *Du point de vue de l'Implémentation :*

- **Temps** : différentes équipes peuvent participer au développement d'un sous-système et accélérer les temps de réalisation.

- **Performance** : la répartition des tâches sur différentes ressources implique un accroissement de la capacité de calcul. Les architectures multiprocesseurs des machines parallèles peuvent être le support matériel de systèmes distribués dans le cadre d'applications nécessitant des temps de réponses rapides. Chaque processeur est associé à un traitement particulier ce qui permet d'augmenter sensiblement la capacité de calcul.

- **Maintenance** : la séparation en différents modules permet de simplifier la maintenance du système. Il faut pouvoir intervenir facilement dans différents domaines de compétence, sans pour autant remettre en cause toute l'architecture du modèle.

5 CONCLUSION

L'IAD fournit des modèles distribués pour représenter l'activité des acteurs de l'entreprise ainsi que les règles de fonctionnement. Dans ces modèles, les connaissances, les méthodes, les règles, et la décision sont distribuées à différents modules autonomes et interactifs (les agents) capables de communiquer entre eux par envoi de messages. Ces agents ont des connaissances limitées à leurs domaines de compétence, une vue restreinte du problème à résoudre, mais ils sont capables de coopérer pour avancer dans la recherche de solutions. Cette population d'agents va reproduire le comportement social des personnes qui interviennent dans la mise en oeuvre des processus de production (aussi bien en terme de décisions que d'actions).

Une architecture distribuée facilite la modularité, le couplage avec d'autres types de connaissances et l'intégration de systèmes hétérogènes. L'extension du système est réalisée par l'ajout d'agents. La séparation des composants du système permet d'accroître la fiabilité de l'ensemble, de gérer les défaillances sans remettre en cause la construction globale. Il faut développer à la fois la distribution et l'intégration des compétences pour que les différences entre les entités autonomes accroissent les capacités du système.

Face à la pléthore de modèles proposés pour la conception de systèmes multi-agents, des plates-formes sont proposées pour tester et comparer différentes formes d'organisation, de procédures de communication,... (MACE [Gasser et al 87], MICE [Durfée, 88], MAGES [Bouron, 93]). Pour guider le concepteur à travers le foisonnement de modèles et de techniques disponibles, des méthodologies de conception sont étudiées [Ovalle et Garbay, 93].

Un aspect primordial reste la mise en oeuvre sur des applications réelles des concepts introduits, d'où l'intérêt de ce travail. En effet les SMA peuvent permettre de construire un environnement distribué capable d'être le support de modélisation du processus global de gestion de production. Les agents du système pourront reproduire les comportements des acteurs du processus en se rapprochant ainsi de la réalité de fonctionnement de l'entreprise.

La modélisation de système de production est de ce fait l'un des domaines prometteurs d'applications des systèmes multi-agents.

CHAPITRE IV

1 INTRODUCTION

Dans le chapitre II, nous avons défini un modèle de compréhension d'organisations productives. Ce modèle, constitué d'un ensemble de « Centres de décision » et de « Centres d'Activités », a permis d'identifier et de formaliser les différents composants de l'organisation, et de décrire les phénomènes d'orientation de la prise de décision par l'intégration de concepts cognitifs au pilotage des différents flux.

Pour évoluer de ce modèle conceptuel à un modèle de représentation informatique, nous allons tenter d'appliquer les principes définis dans le chapitre III concernant les systèmes multi-agents ; c'est-à-dire formaliser la connaissance de manière « intelligente » et modéliser les interactions entre les différents acteurs décisionnels.

Pour cela, nous avons choisi de redéfinir les « Centres de Décision », spécifiés dans le modèle de compréhension, sous la forme d'« Agents Cognitifs », autonomes et interdépendants : *Autonomes* car ils disposent de degrés de liberté dans leur prise de décision, *Interdépendants* parce qu'ils prennent leurs décisions en partageant une même connaissance de l'entreprise (connaissance qui évolue continuellement avec les décisions des uns et des autres), et parce que les décisions prises sont parfois concurrentes et sources de conflits.

On peut comparer ces interactions entre agents cognitifs d'une organisation aux interactions entre experts travaillant en groupe. Chacun possède une connaissance parcellaire de l'ensemble des problèmes du système et tous coopèrent à la réalisation d'un même objectif global : gérer la production en tenant compte de l'ensemble des contraintes et des objectifs de l'entreprise.

Dans ce chapitre nous allons dans un premier temps, décrire le passage du modèle systémique de compréhension au modèle de représentation à base d'agents, c'est-à-dire faire la

correspondance entre les concepts définis dans le premier modèle (connaissances, rationalités, intentions, ...) et les éléments constituant la structure d'un agent cognitif générique. Puis dans un second temps, nous détaillerons la société d'agents en termes d'organisations, de structures, et de communications.

2 DU MODELE DE COMPREHENSION AU MODELE DE REPRESENTATION AGENTS

Comme nous l'avons vu dans le chapitre II (cf. 4.2) l'atome de base du modèle systémique de compréhension est constitué de « Centres de Décision » qui dirigent des « Centres d'Activités », ces derniers représentent l'ensemble des processus et chaînes d'activités de l'entreprise et ont pour objectif de transformer des flux physiques ou informationnels.

La modélisation de ces « Centres d'Activités » et des différents flux sera détaillée dans le chapitre suivant (modèle de simulation). En effet ces concepts sont relativement classiques, et de nombreux travaux de recherche sur la simulation des processus opérationnels ont été effectués ([Hill, 93], [Kellert, 92], [Ye, 94], [Bel et al, 90]). Ils ne représentent donc pas l'intérêt principal de notre étude. Les « Centres de Décision » quant à eux nécessitent une réflexion plus approfondie, aussi bien en termes conceptuels qu'implémentatoires.

2.1 Les Centres de Décisions

Un « Centre de Décision » (fig. IV.1) est constitué de connaissances du domaine, de rationalités, d'intentions propres, et d'informations perçues et reçues (communication) de l'environnement. Il oriente le fonctionnement des « Centres d'Activités » en leur transmettant des décisions et des rationalités (elles n'existent pas pour les niveaux les plus bas de l'organisation) qui résultent d'un processus de raisonnement sur l'ensemble de ses connaissances.

Cette description des « Centres de Décision » faite par van Gigch [van Gigch, 91], et spécifiée dans le modèle de compréhension, présente une sorte d'homomorphisme avec la définition des agents cognitifs (cf. III.2.3).

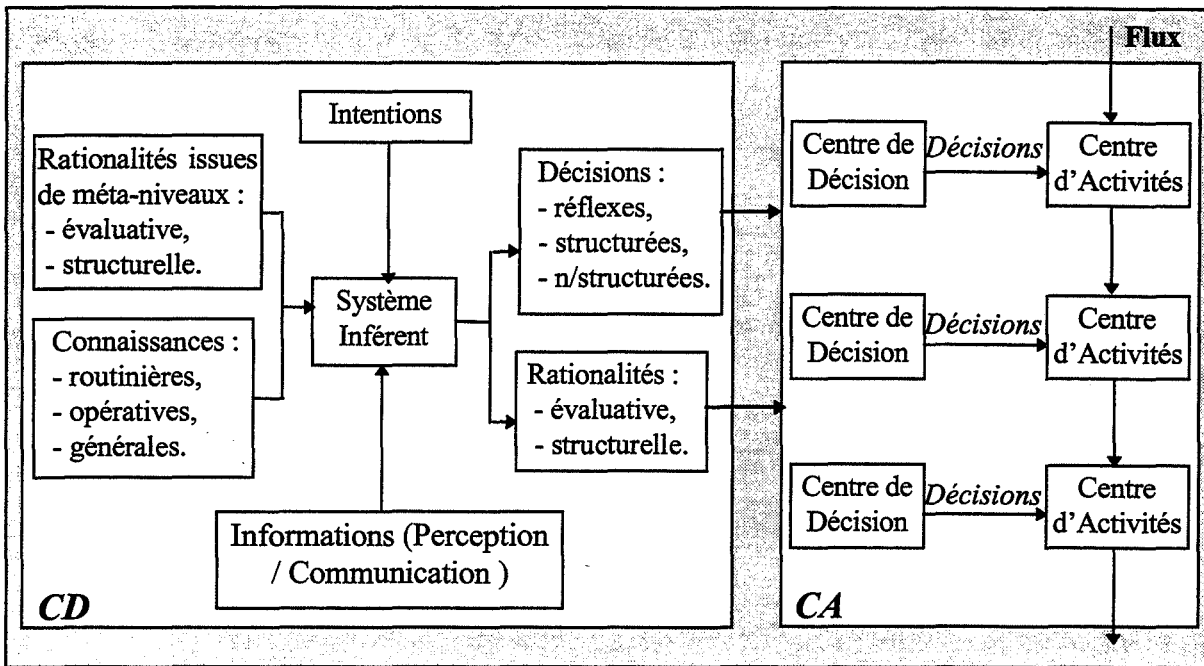


Figure IV.1 « Le Modèle de Compréhension »

Nous aurions pu utiliser, pour modéliser ces processus décisionnels, des méthodes classiques de type multicritères, réseaux de neurones, recherche opérationnelle, ... mais l'intérêt pour nous était de représenter et d'étudier les interactions entre les acteurs décisionnels, et intégrer dans le processus de prise de décision les notions de motivation, d'intention et de rationalités (c'est-à-dire les phénomènes d'orientation de la décision). Nous nous sommes donc orientés vers les systèmes multi-agents.

Nous allons donc tenter, dans les paragraphes suivants, de constituer une société d'agents qui va s'intégrer à ce modèle de compréhension pour représenter les « Centres de Décision » et leurs interactions avec les « Centres d'Activités ».

2.2 Les Agents Cognitifs

« Les agents sont doués d'autonomie, ou tout au moins d'une autonomie de comportement. Cela signifie qu'ils ne sont pas dirigés par des commandes venant de l'utilisateur, mais par un ensemble de buts propres à chaque agent » [Ferber, 94].

Un agent cognitif, tel que défini dans le chapitre précédent, est constitué d'une architecture de base et d'un ensemble de fonctionnalités :

- **Perception** : processus permettant l'acquisition de connaissances sur l'environnement dans lequel évolue l'agent.
- **Communication** : mécanismes d'interactions et de traitement des informations en provenance des autres agents.
- **Contrôle** : connaissances sur la synchronisation et le contrôle des tâches internes (par exemple l'analyse d'un message), et des tâches externes concernant la collaboration avec d'autres agents.
- **Raisonnement** : processus qui permet à l'agent de raisonner pour prendre des *décisions* de manière autonome.

Ces fonctionnalités s'articulent autour d'un espace de connaissances qui représente ce que l'on nomme communément [Shoham, 93] l'*état mental* de l'agent. Cet état mental correspond généralement à un ensemble de croyances, d'intentions et de compétences propres à l'agent. Les *croyances* représentent la perception qu'a l'agent de l'univers dans lequel il évolue (aussi bien les connaissances qu'il a sur les autres agents et sur lui même, que les connaissances perçues de l'environnement). L'*intention* est définie [Searle, 90] [Bouron, 93] comme un but à long terme persistant, mais révoquant, qui guide les délibérations et les actions de l'agent ; les *compétences* correspondent à l'expertise de l'agent, à son savoir-faire.

Selon la nature de cet état mental, les agents cognitifs auront des prédispositions pour :

- le **Travail Collectif** : capacité d'un agent à collaborer et participer à la résolution collective d'un problème, ou à une prise de décision collective.
- l'**Apprentissage** : facultés d'un agent à enrichir et à mettre-à-jour ses connaissances en fonction de l'évolution du système et de sa propre expérience acquise après des raisonnements successifs.

Après cette description générique des composants cognitifs des agents, nous allons cerner les points qui nous semblent primordiaux dans le contexte de la prise de décision et de la gestion des systèmes de production.

Dans le cadre particulier de la prise de décision distribuée dans les organisations productives, le cycle des agents peut être partagé en deux phases principales :

- dans un premier temps une phase de perception et de prise en compte de l'environnement (autres agents, système physique, système d'information, ...), suivi de négociations (communications) avec les accointances.

- dans un second temps une phase de raisonnement/prise de décision, en fonction de rationalités et d'intentions propres, qui entraîne le pilotage et la gestion des centres d'activités.

Pour cela, et en nous inspirant d'un modèle proposé par Bussman [Bussman, 94], nous proposons un modèle fonctionnel d'agents cognitifs adapté au contexte de la prise de décision dans les organisations productives (modèle de compréhension) et qui reprend les principales fonctionnalités citées ci-dessus (fig. IV.2).

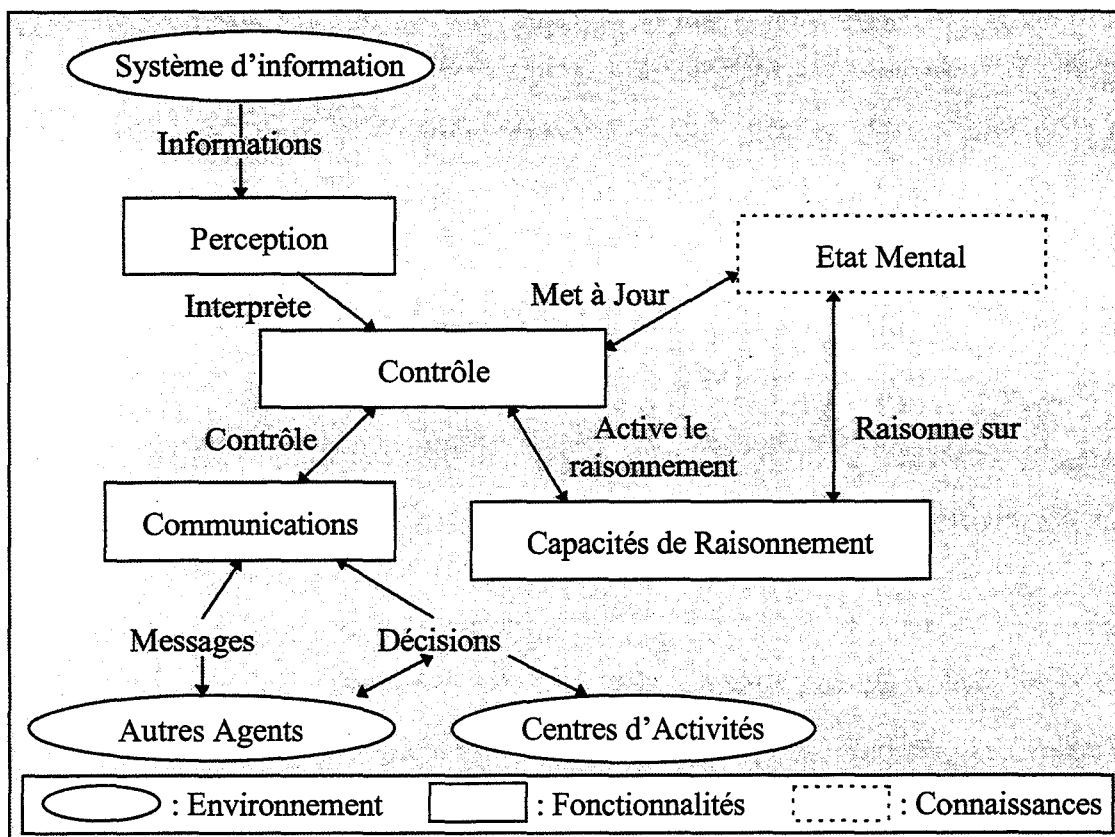


Figure IV.2 « Modèle Fonctionnel d'un Agent Cognitif »

Les agents évoluent dans un environnement et possèdent des connaissances pour résoudre des problèmes. Ils scrutent cet environnement pour acquérir des informations, communiquent avec d'autres agents, et prennent des décisions sur les entités du système.

Les principales fonctionnalités représentées dans ce schéma sont centrées autour d'un module d'exécution qui supervise les différentes capacités cognitives de l'agent, met à jour l'état mental, et contrôle les interactions avec l'environnement et avec les autres agents.

La notion de croyance est prise en compte dans ce modèle par le fait que les agents cognitifs perçoivent leur environnement par le biais d'informations qui peuvent être bruitées, et par les communications qu'ils entretiennent avec les autres agents. Ils ont une vision partielle et non objective du monde qui les entoure.

Dans la suite de notre étude nous nous focaliserons donc sur les aspects organisation, coopération, raisonnement, et contrôle ; nous n'insisterons pas sur le concept d'apprentissage, qui pourrait induire l'émergence d'une auto-organisation de l'organisation productive et qui passe par un enrichissement dynamique de la connaissance des agents, car c'est une partie très importante de la modélisation des acteurs décisionnels qui fait l'objet actuellement de travaux de recherche se basant sur des techniques d'apprentissage par la simulation.

Nous présenterons la société d'agents, selon sur trois axes principaux : l'organisation de la société d'agents, la structure des agents, et la communication entre agents.

3 ORGANISATION DE LA SOCIETE D'AGENTS

Comme nous l'avons vu dans le chapitre III, un agent doit avoir deux types de tendance : une tendance « sociale » tournée vers la collectivité, qui est représentée par un ensemble de connaissances et de mécanismes pour s'intégrer dans la vie du groupe, et une tendance « individuelle » qui est définie par ses rationalités et ses intentions.

Dans le cadre des organisations productives, et particulièrement dans les systèmes manufacturiers, la tendance sociale qui se traduit par la capacité des agents à coopérer est fortement liée d'une part à l'organisation de l'entreprise (processus, chaînes d'activités, etc.) et d'autre part aux degrés de liberté (autonomie) accordés aux agents en terme de prise de décision. Un modèle de simulation pertinent devrait donc permettre de représenter un certain nombre d'organisations dans leurs dimensions cognitives et décisionnelles.

Par rapport à notre problématique, nous définirons trois types de structure organisationnelle afin de modéliser les concepts importants liés à la vision nouvelle de l'entreprise : une structure hiérarchique, une structure de dépendance, (fig. IV.3), et une structure de type « Effet de groupe » (fig. IV.4).

Ces structures organisationnelles superposées vont faciliter la spécification des protocoles de coordination et de synchronisation des agents cognitifs.

❶ *Structure hiérarchique* : cette structure traduit la hiérarchie de responsabilité habituellement en cours dans l'entreprise, elle définit un certain nombre de niveaux dans lesquels un ensemble d'objectifs, d'indicateurs de performances et de décisions sont déclinés. Elle n'est évidemment pas totalement compatible avec la vision moderne de l'entreprise basée sur les concepts de projets, de processus, et d'autonomie des acteurs ; mais elle va permettre, par le biais d'un ensemble de scénarios de simulation, la comparaison de différents types d'organisations.

❷ *Structure de dépendance* : elle se superpose à la hiérarchie, et permet de définir les différents protocoles de communication et de synchronisation des agents d'un même niveau hiérarchique, et de constituer ainsi un réseau de coopération potentiel.

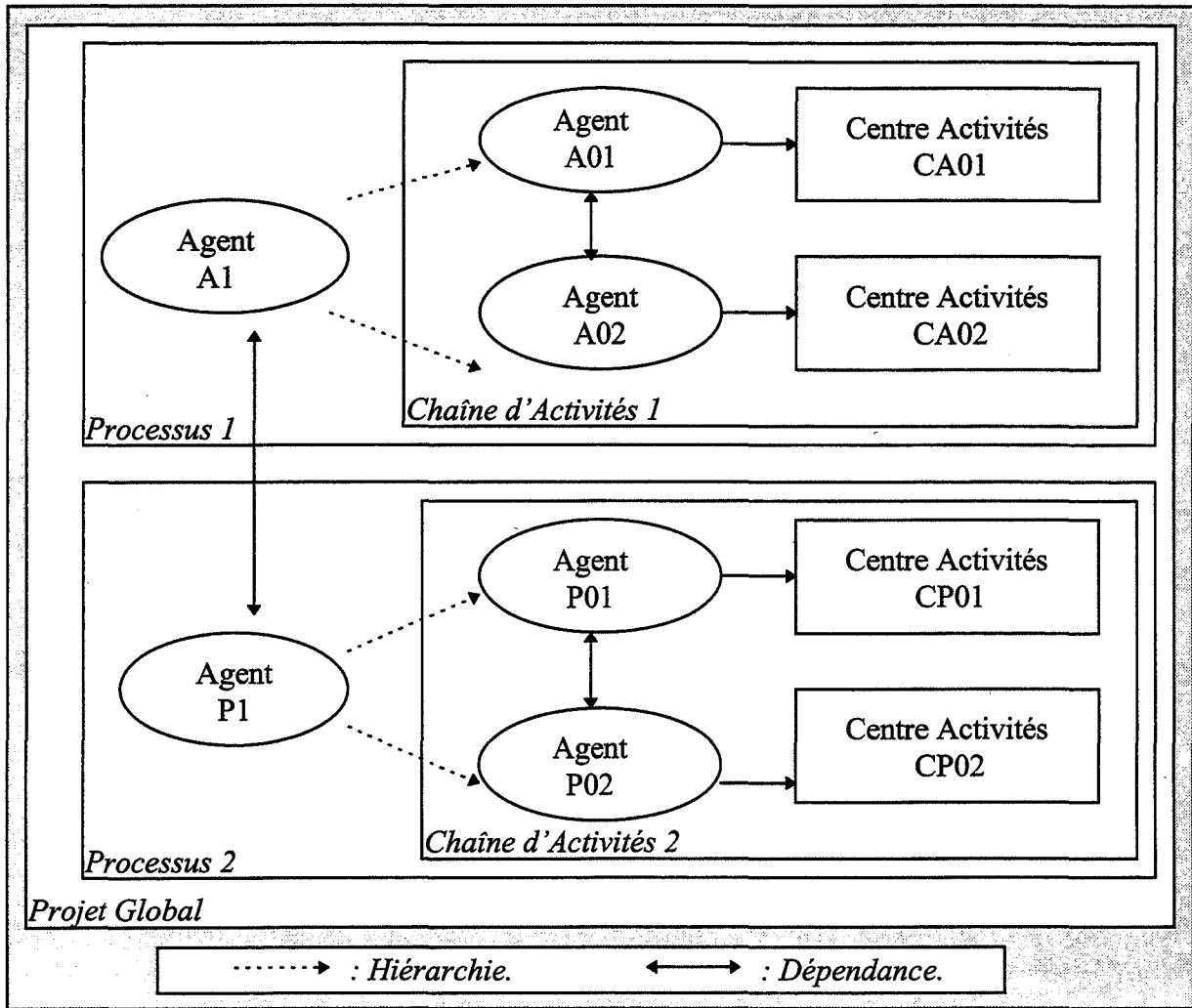


Figure IV.3 « Structures hiérarchique et de dépendance des Agents »

③ *Structure de type « Effet de Groupe »* : cette structure, qui est plus conforme à la vision de l'entreprise moderne (notion d'équipe, de groupe de réflexion, etc.) est à l'opposé de la structure hiérarchique classique. En effet, les objectifs peuvent être pris en charge par une équipe (quel que soit son niveau) et ne sont dépendants de la hiérarchie que par le biais d'indicateurs de performances globaux.

Ainsi, les niveaux supérieurs d'une organisation pourront exercer une influence significative sur les résultats finaux d'une procédure de prise de décision complexe, sans nécessairement définir de décisions directes.

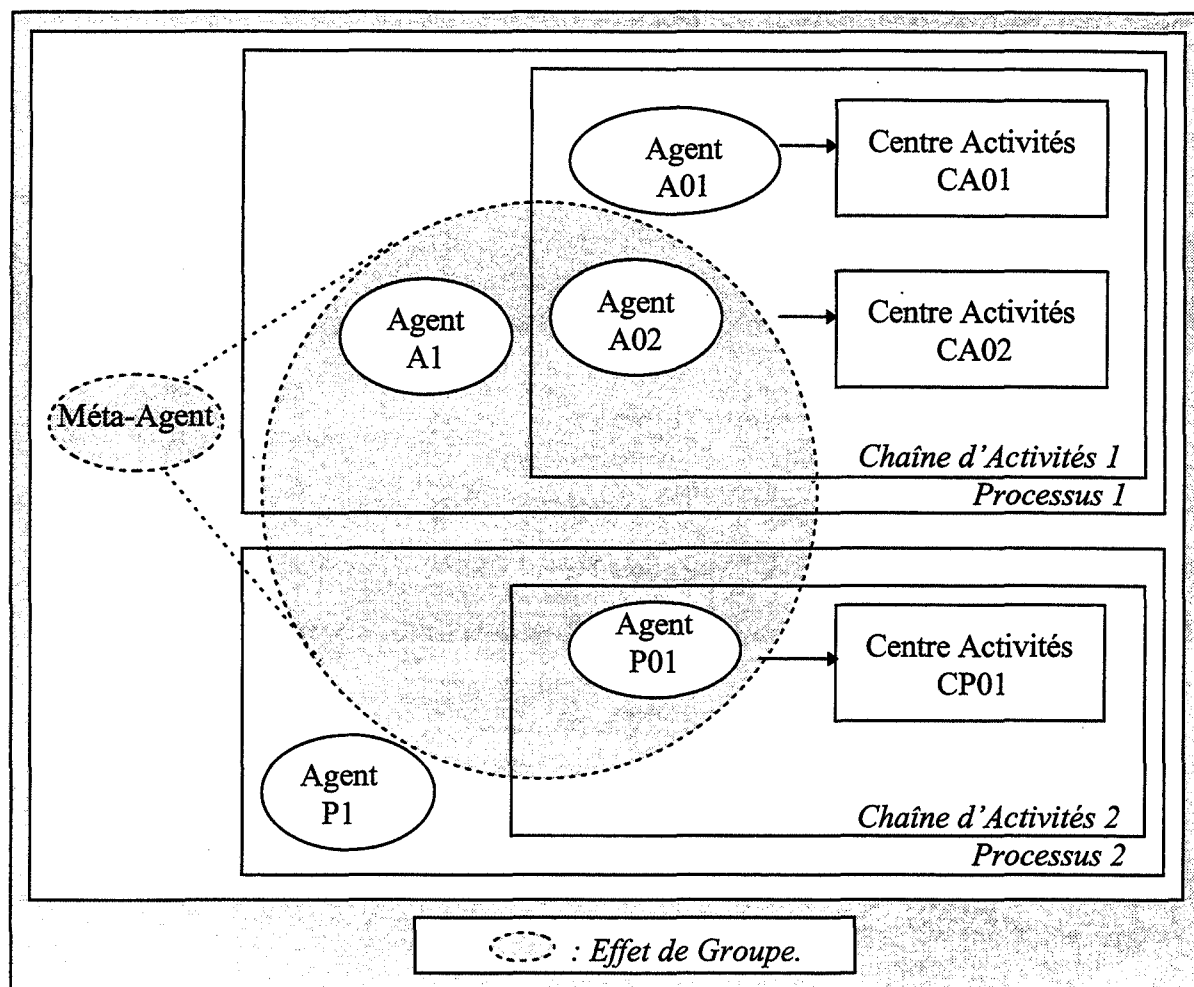


Figure IV.4 « Structure de type Effet de Groupe »

Cette structure sera définie par le concept de méta-agent, qui consistera, dans la vision méta-systémique, à représenter virtuellement la notion de groupe (ensemble d'agents participant à un travail collectif) et le principe : « l'ensemble est plus que la somme des parties ». Les méta-décisions que va générer ce méta-agent vont sous-entendre un ensemble d'accords sur « qui fait quoi », « quand », selon quels critères. Ainsi les décisions seront prises de manière collective, le méta-agent ayant pour mission de synthétiser et de coordonner l'ensemble des connaissances et rationalités des participants du groupe et éventuellement de résoudre des conflits inhérents à des situations décisionnelles contradictoires.

Un exemple de méta-agent sera détaillé dans les chapitres suivants. Nous définirons en particulier un contexte de raisonnement (conflictuel) dans lequel ce type de structure est approprié.

4 ARCHITECTURE DES AGENTS COGNITIFS

Les agents cognitifs ont pour mission principale l'organisation et la gestion du fonctionnement de l'entreprise. Cette gestion se fera par le biais de concertations et de négociations entre agents, et par un pilotage des centres d'activités en fonction d'intentions et de rationalités propres à chacun.

4.1 Un modèle de Représentation d'Agent Cognitif

A partir de ces principes de base et des différents concepts définis dans le modèle de compréhension et dans le modèle fonctionnel (fig. IV.2), nous pouvons proposer une architecture globale de représentation des agents qui vont coexister dans notre système.

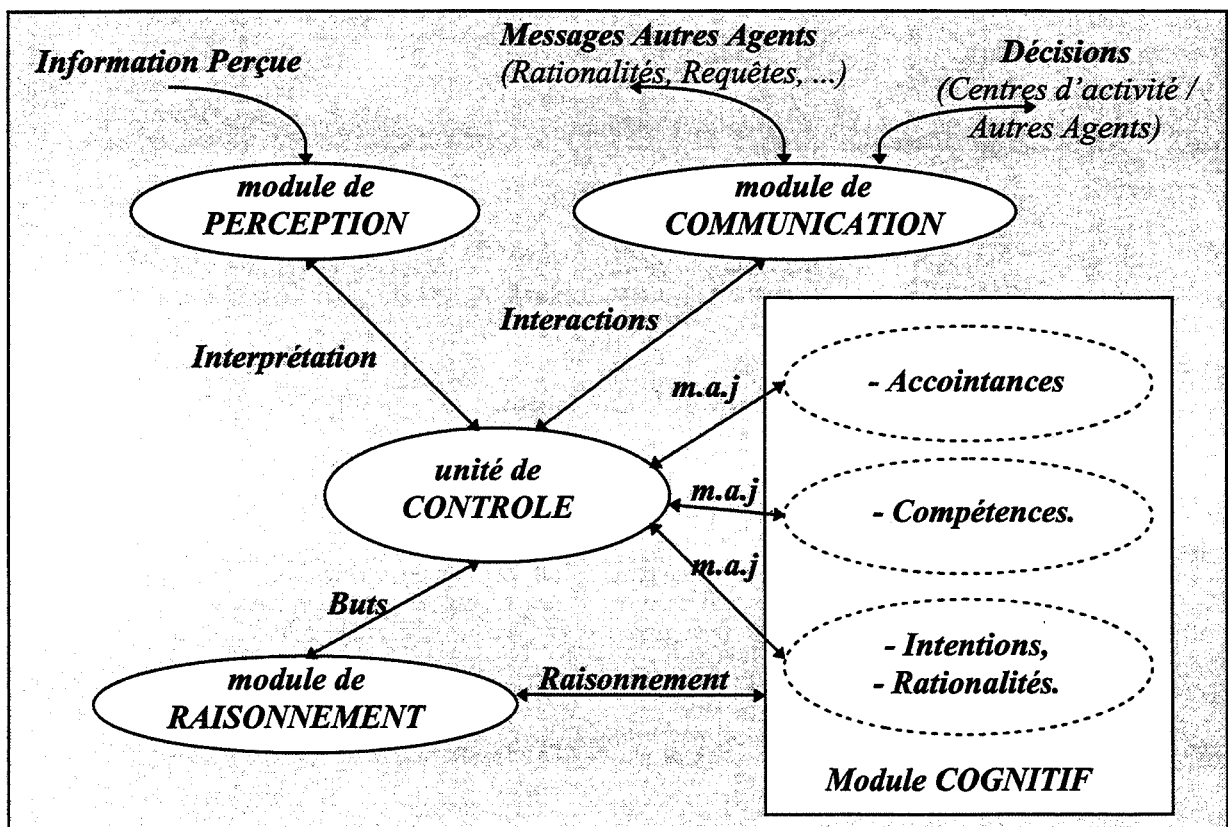


Figure IV.5 « Modèle de Représentation Générique d'Agent Cognitif »

Ce modèle, basé sur une approche multi-modules, permet une description indépendante et modulaire de chacune des tâches de perception, de communication, de raisonnement et de prise de décision. Les différents modules sont organisés comme suit :

4.1.1 Le Module Cognitif

Ce module représente l'état mental de l'agent (fig. IV.6), il est caractérisé par des :

- **accointances** : ce sont les connaissances sur les autres agents cognitifs du système avec lesquelles l'agent est en relation (lien de dépendance, lien de hiérarchie, effet de groupe),
- **compétences** : qui constituent, de manière générale, un ensemble de connaissances sur les règles de fonctionnement de l'entreprise et sur l'état du système, et en particulier une expertise qui correspond à un savoir-faire propre à l'agent.
- **intentions** et **rationalités** qui représentent à un moment donné, les motivations personnelles de l'agent (intentions), et les modes d'évaluation (rationalités évaluatives) et degrés de liberté au sein de la structure (rationalités structurelles) définis par les niveaux supérieurs.

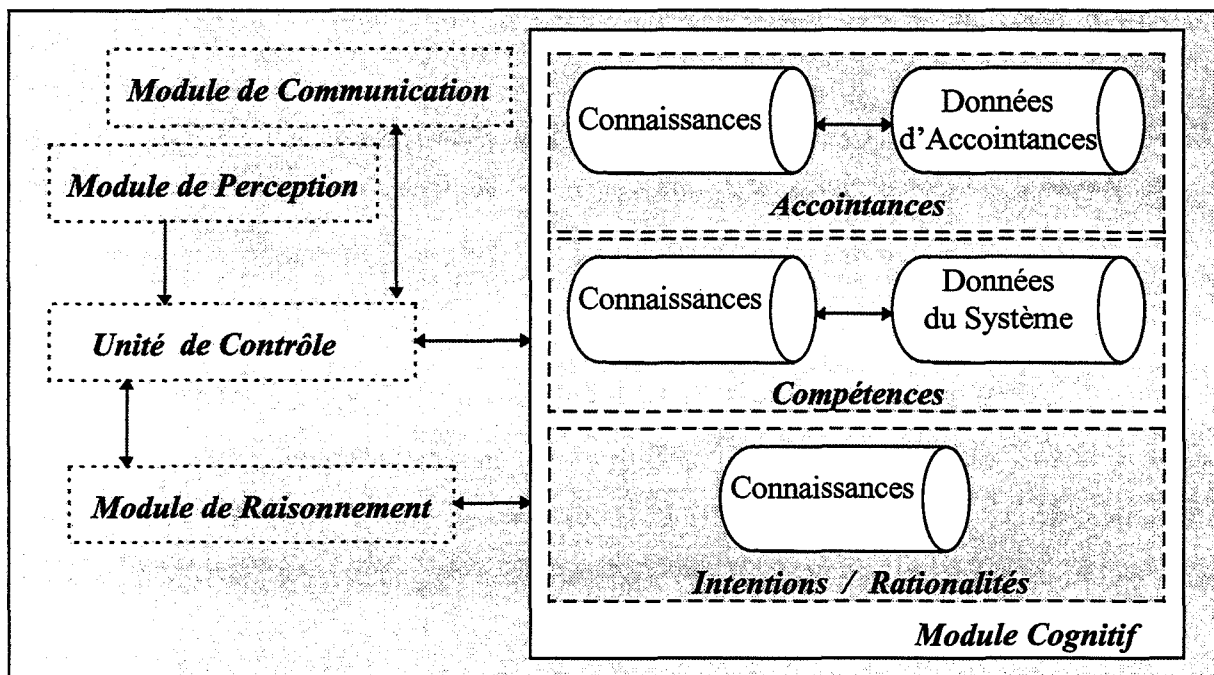


Figure IV.6 « Module Cognitif d'un Agent »

Les éléments du **Module Cognitif** sont donc constitués d'un ensemble de connaissances, et de données qui caractérisent l'état du système à un instant donné. Par exemple, les connaissances d'accointances regroupent : l'ensemble des agents avec lesquels l'agent est en relation, des connaissances propres à la communication, des comportements associés à chacune des

accointances, etc. Alors que les données d'accointances font références à la disponibilité des accointances (état), leur nombre, etc.

De la même manière, parmi les compétences il y a des connaissances spécifiques au domaine (règles de conduite d'un atelier, méthodes de gestion de production, savoir-faire par rapport à un processus particulier, etc.), alors que les données forment une perception du système d'information (taux d'utilisation d'une ressource, capacité, état des stocks, liste d'ordres de fabrication, etc.) représentée au niveau de l'agent et qui va évoluer tout au long du processus de fonctionnement du système.

La connaissance contenue dans le *Module Cognitif* est donc représentée par des structures de données qui peuvent être modélisées sous différentes formes :

- des sources de connaissances (règles et faits) indépendantes et modulaires,
- des bases de données,
- des attributs et des méthodes rattachés à des structures de type objets, etc.

Une description plus approfondie de la connaissance et de la manière dont elle est structurée sera faite dans les chapitres suivants (simulation et validation).

4.1.2 L'Unité de Contrôle

Cette unité gère l'ensemble des modules de l'agent cognitif, c'est-à-dire détecte les situations pour lesquelles l'agent doit réagir (arrivée d'un message provenant d'un autre agent, indicateur de performance modifié, etc.) et si nécessaire, suspend, supprime, ou introduit de nouvelles informations (connaissances, intentions, rationalités, etc.) dans le module cognitif de l'agent.

Ce module permet donc à l'agent :

- d'observer son propre comportement,
- de déterminer les actions à exécuter (raisonnement, interprétation d'un message, etc.),
- d'intégrer les informations délivrées par les modules de perception et de communication,
- de gérer la coordination entre les différents modules, ...

Il peut être considéré comme un méta-comportement, car il est souvent modélisé comme un mécanisme « intelligent » de gestion des différentes activités de l'agent à partir de méta-règles, d'heuristiques, et de connaissances sur l'état de l'environnement.

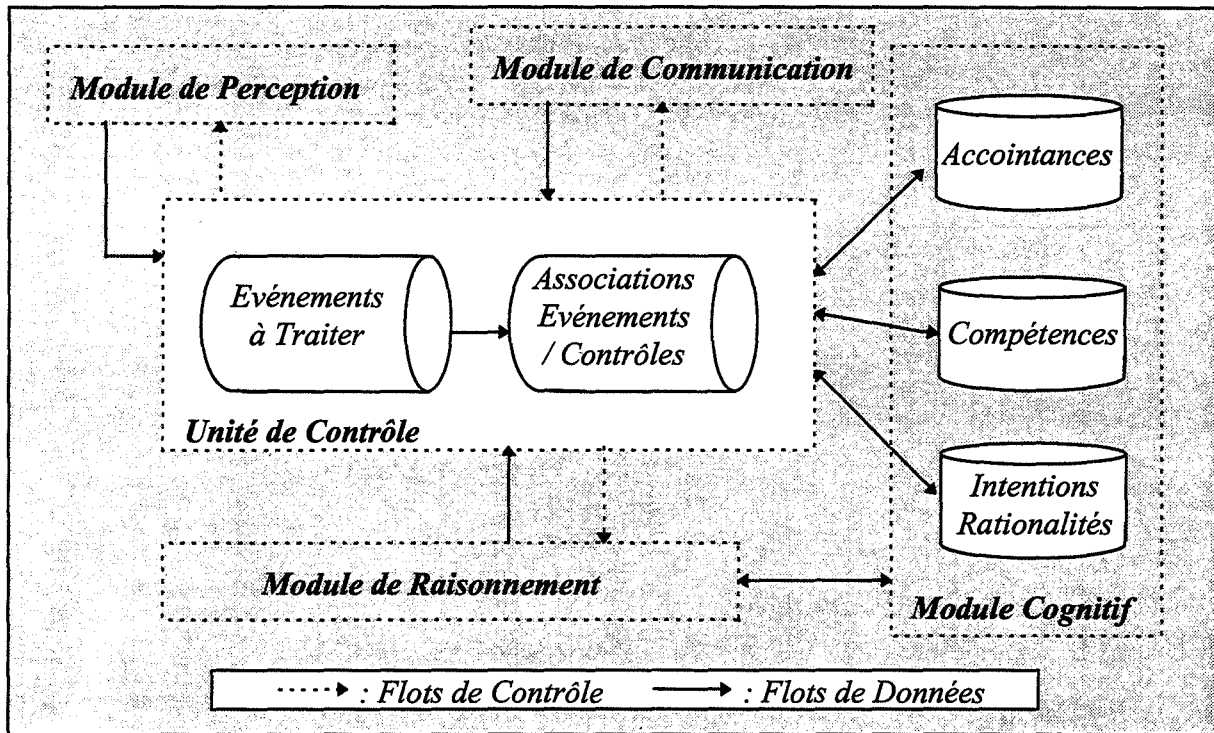


Figure IV.7 « Module de Contrôle d'un Agent »

La synchronisation des différents modules d'un agent par l'unité de contrôle se fait à partir de la notion d'« événements » (fig. IV.7) qui s'inspire des mécanismes de contrôle dans les systèmes à base de *tableaux noirs* [Nii, 86]. Ces événements sont de deux types :

- Des « flots de données » (informations, messages, signaux, ...), qui permettent de communiquer l'état des modules à l'unité de contrôle, et à cette dernière de modifier le module cognitif.
- Des « flots de contrôle » qui sont représentés par un signal d'activation et un signal d'inhibition. Les modules à contrôler sont constitués par des conditions d'activation/inhibition et par un corps exécutable. A chaque réception d'événement, l'unité de contrôle sélectionne les modules qui voient leurs conditions satisfaites et génère les flots d'activation ou d'inhibition correspondant (fig. IV.8).

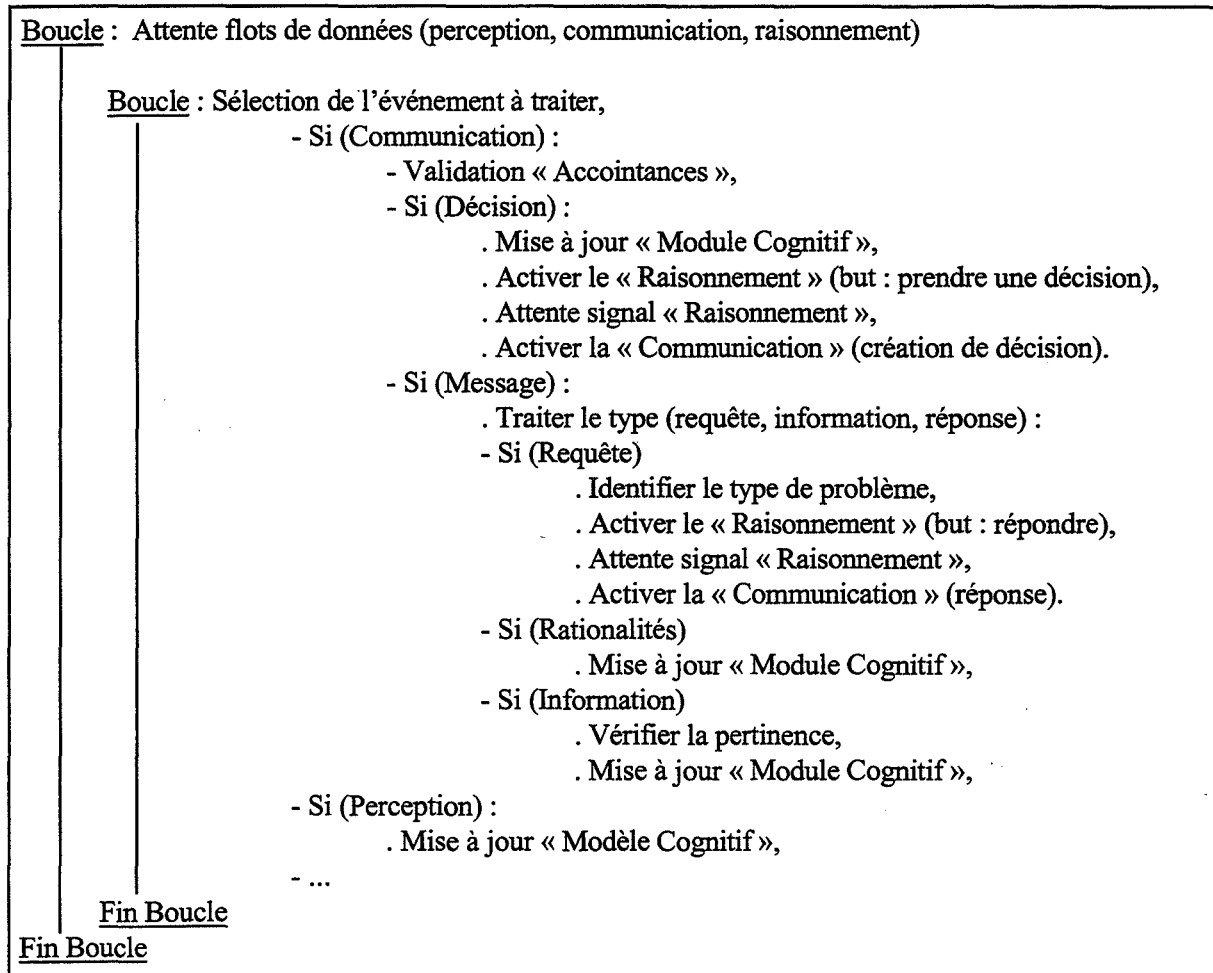


Figure IV.8 « Algorithme de Contrôle d'un Agent »

4.1.3 Le Module de Raisonnement

A partir de l'état mental de l'agent, des interactions avec les autres agents, et du type de décision à prendre, le module de raisonnement va inférer une séquence d'actions en fonction de nouveaux objectifs (figure IV.9). Il comprend principalement :

- un ensemble de méta-règles représentant les opérations appropriées applicables (choix des règles à activer, type de données pertinentes, envoi de flots de données à l'unité de contrôle, etc.) concernant les différents buts (création de décision, réponse à requête, etc.).

- une procédure d'exécution (mécanisme d'inférence) qui synchronise les règles et traitements, et évite, entre autres, les incohérences que peut provoquer l'exécution concurrente de plusieurs bases de règles.

Dans les exemples présentés (chapitre VI) nous verrons que, dans un premier temps, ce processus de raisonnement peut être émulé de manière simple par une recherche associative sur la structure de données constituée par le « *Module Cognitif* » de l'agent.

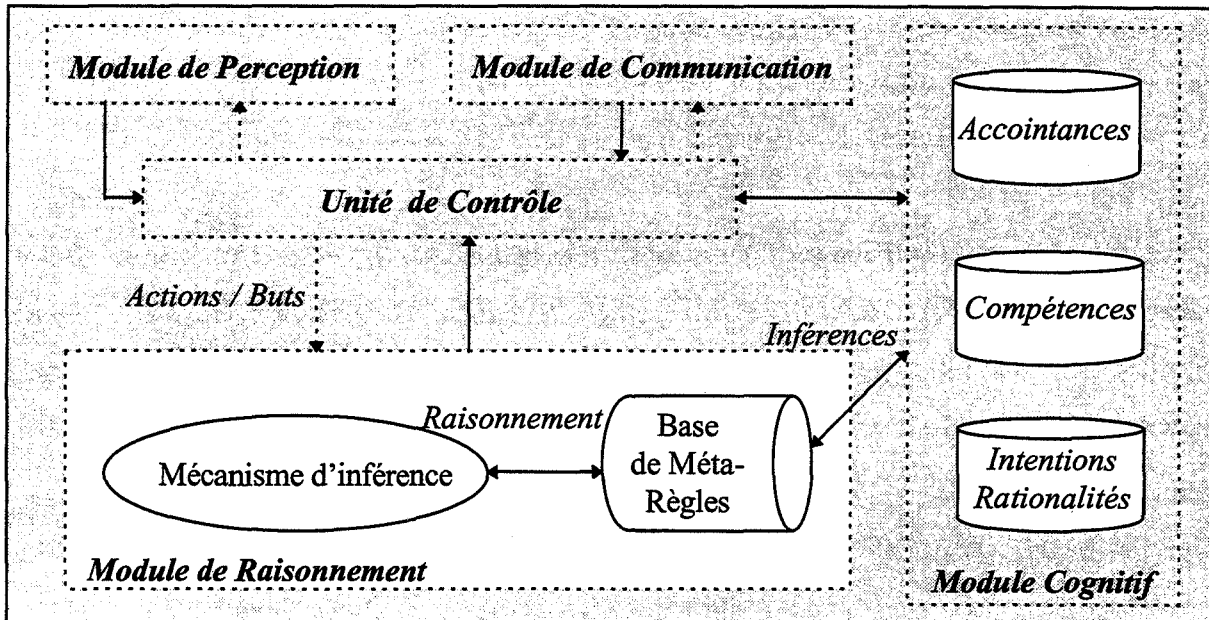


Figure IV.9 « Module de Raisonnement d'un Agent »

En fonction de l'action à effectuer (fig. IV.10), le mécanisme d'inférence va activer un ensemble de méta-règles concernant les procédures à suivre. A partir de ce premier raisonnement, une série de sous-buts vont être identifiés : à qui transmettre une décision ou un message, sur quelle base (intentions, compétences, accointances, ...) doit-on axer le raisonnement, quelles sont les données pertinentes concernant l'état du système, ... Ces sous-buts vont permettre de cerner les connaissances sur lesquelles le raisonnement va s'effectuer.

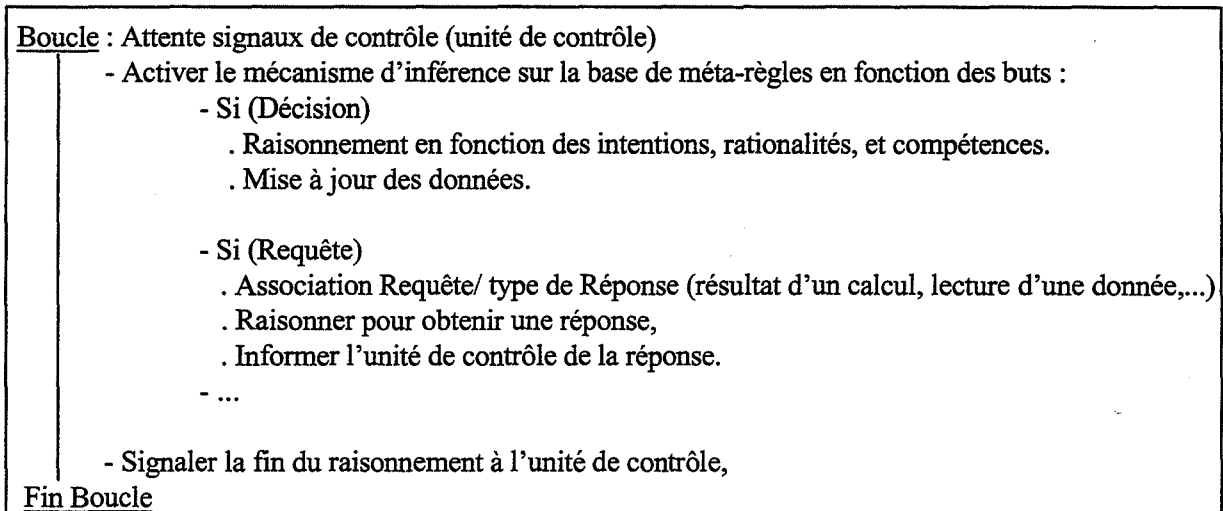


Figure IV.10 « Algorithme de Raisonnement d'un Agent »

4.1.4 Le Module de Communication

Il se charge de recevoir, d'interpréter et de transmettre des messages aux autres agents (gère les interactions par le biais de boîtes aux lettres) en utilisant des protocoles de communication (actes de langages, type de message, etc.). Il permet également l'envoi des décisions aux centres d'activités et aux agents de niveaux inférieurs. Il sert donc d'interface entre l'agent et ses accointances et de canal d'interprétation et de transmission des messages (fig. IV.11).

Notre modélisation étant bâtie sur l'interaction, dont la condition principale est la possibilité de communiquer, l'expertise de communication est une connaissance particulière qui est isolée dans chaque agent (au niveau du module cognitif « accointances », d'où le passage par l'unité de contrôle) (fig. IV.12).

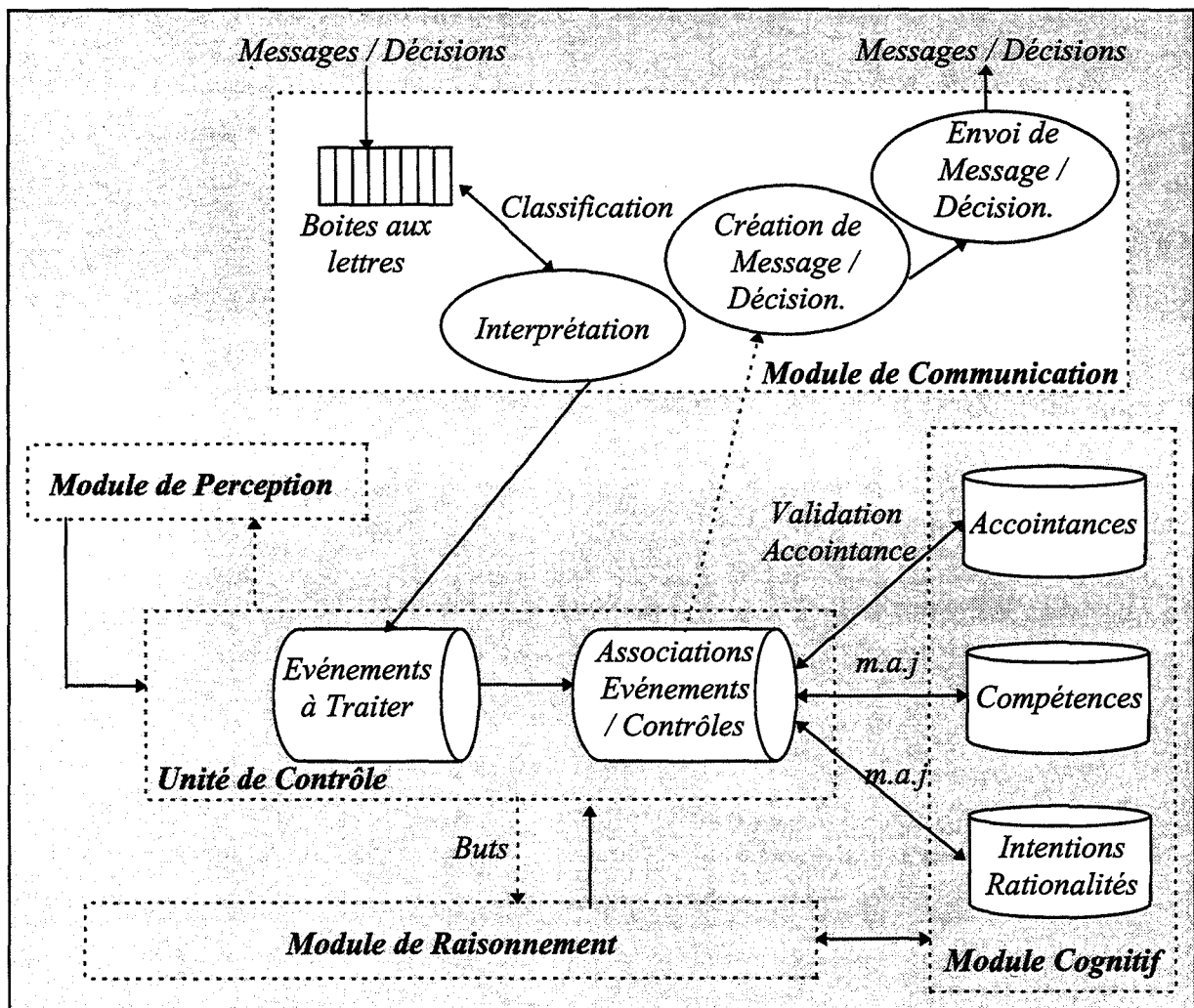


Figure IV.11 « Module de Communication d'un Agent »

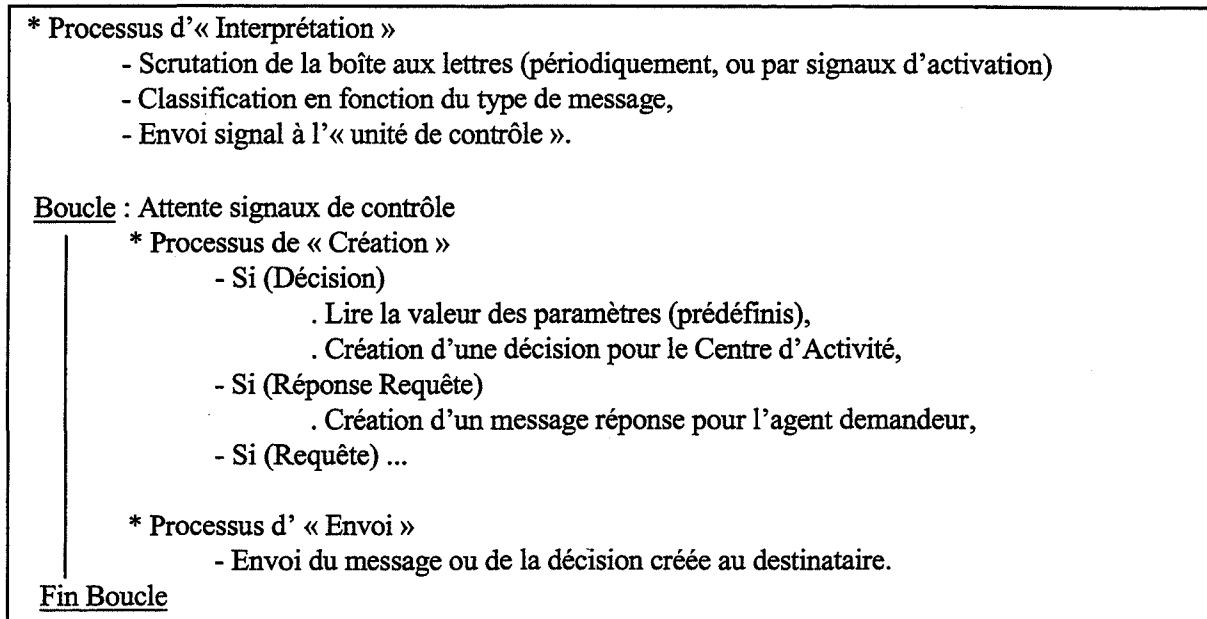


Figure IV.12 « Algorithme de Communication d'un Agent »

4.1.5 Le Module de Perception

L'agent cognitif évoluant dans un environnement changeant, il est muni de dispositifs de perception qui sont gérés par un **module de perception** (fig. IV.13). L'objectif premier de ce module est de scruter les variables externes (indicateurs de performances, variables globales, etc.) qui constituent le système d'information de l'entreprise, et de permettre ainsi la mise à jour du **Module Cognitif** par le biais de l'unité de contrôle. Cela revient à dire, qu'il est responsable d'une partie des interactions (scrutation de tableaux noirs, mise à jour de base de données, etc.) avec l'environnement [Guessoum, 94].

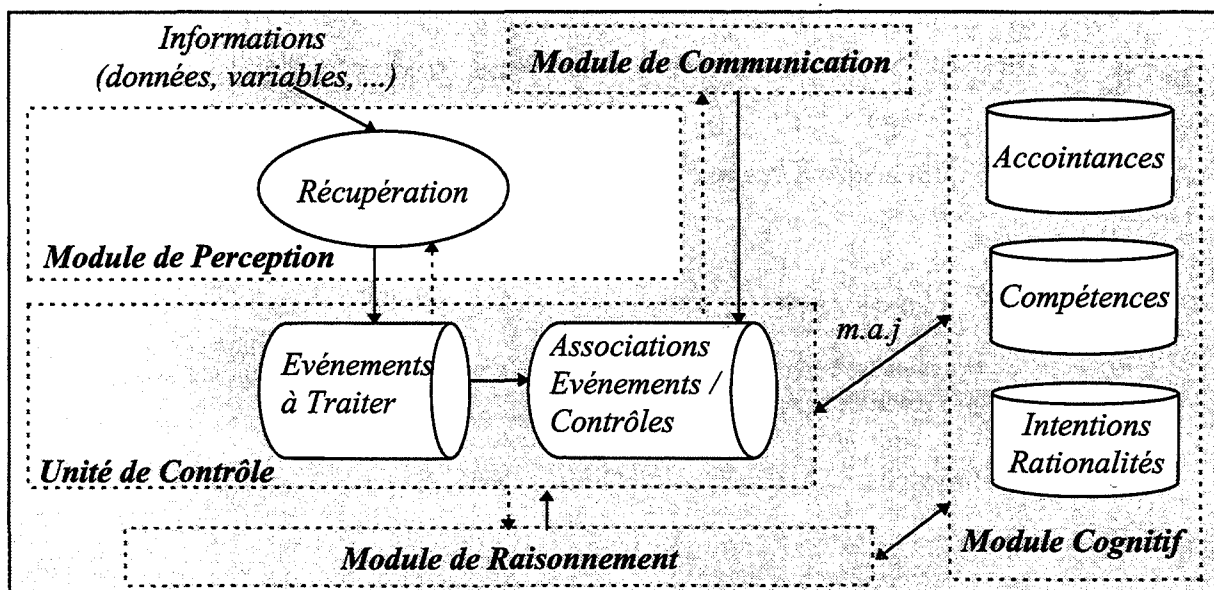


Figure IV.13 « Module de Perception d'un Agent »

Par rapport à notre problématique, l'ensemble des savoir-faire et des connaissances propres aux acteurs est représenté dans le module cognitif de l'agent. En ce qui concerne l'environnement (les données du système de production), le système d'information complet de l'entreprise (sous forme d'une *mémoire partagée* mise à jour par les centres d'activités) est consultable par le biais de ce module de perception. Mais dans la réalité des organisations, il est évident que ce système d'information n'est pas accessible à tous les acteurs de l'entreprise, et surtout, les informations qu'il est censé contenir ne sont jamais parfaites.

Pour représenter ces restrictions, le module de perception doit être défini (fig. IV.14) de telle sorte que :

- l'agent cognitif n'ait accès qu'à une certaine partie du système d'information : selon le processus auquel il est rattaché, les informations nécessaires seront ciblées. Le module de perception sera chargé périodiquement de récupérer ces données (au moment d'une prise de décision par exemple), de les traiter (vérification, comparaison à des seuils, etc.) puis de les communiquer à l'unité de contrôle qui, en fonction des tâches à effectuer (création d'une décision ou d'un message, résolution d'un problème, etc.), va les intégrer dans le module cognitif pour pouvoir en tenir compte lors du raisonnement.
- les informations recueillies puissent être incomplètes, bruitées et parfois indisponibles. La réalité de l'entreprise prouve que les systèmes d'informations ne sont jamais aussi complets et parfaits que nous le souhaiterions. Pour cela, l'incomplétude de l'information sera simulée par le biais de fonctions aléatoires (bruits) traduisant des dysfonctionnements observés en production. On peut imaginer faire arriver une information à destination une fois sur deux, ou modifier la valeur d'une variable d'un epsilon quelconque, etc.

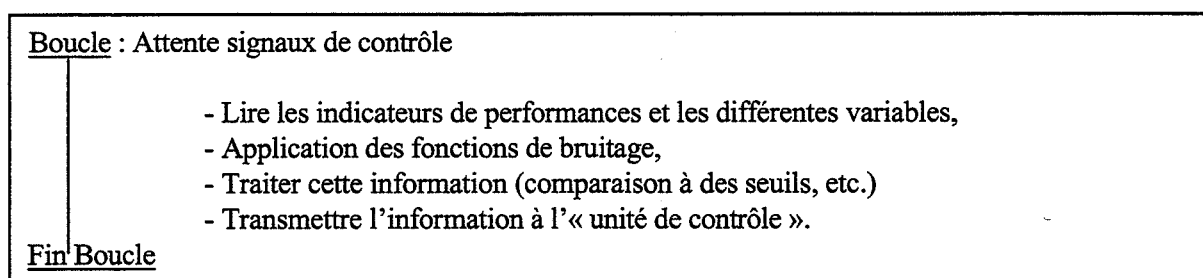


Figure IV.14 « Algorithme de Perception d'un Agent »

4.2 Synthèse : Cycle d'un Agent

Tous les agents possèdent un même cycle de base qui permet de reproduire le fonctionnement opportuniste de l'agent. En fonction des modifications effectuées sur les structures de données ou des messages reçus (informations, intentions, buts, rationalités, etc.), l'agent va raisonner et déclencher, si nécessaire, des communications (avec ses accointances). Il va également générer des décisions pour le « Centre d'Activités » qui lui est associé ainsi que des décisions et des rationalités pour les agents de niveaux inférieurs (quand ils existent).

Ce cycle de base est donc initié par :

- l'arrivée de « messages » : requêtes, informations (panne sur machine, stock saturé, etc.) ou rationalités provenant d'autres agents, et de « décisions » de niveaux supérieurs.
- la perception d'événements prédéfinis : la valeur d'un indicateur qui dépasse un certain seuil, état d'un centre d'activité (occupé, libre, ...), etc.

Ces événements, après une phase d'interprétation, entraînent l'exécution de l'unité de contrôle et l'activation des différents modules (raisonnement, communication, perception) par ce dernier. L'activation du raisonnement est souvent périodique (par exemple chaque semaine on fait un nouveau calcul des besoins et on génère de nouveaux ordres de fabrication), mais peut être le fait d'événements non planifiés temporellement (panne de machines, matières premières non disponibles, etc.).

Nous verrons plus en détail dans le paragraphe suivant, concernant la communication, la manière dont sont gérés ces différents types de synchronisations d'activations.

5 LA COMMUNICATION

Après avoir défini une société d'agents organisés et une structure générique d'agent cognitif, nous nous intéressons maintenant aux problèmes de communication et à la coopération entre agents.

L'organisation des agents dans notre système est fortement liée à la vision « processus » de l'entreprise. La décomposition en projets, processus et chaînes d'activités engendre différents niveaux de responsabilités et de prises de décision. Les concepts de coopération et de négociation sont donc très importants au sein de ces niveaux.

Dans le cadre particulier de la simulation d'organisations productives, nous avons vu que les agents vivent alternativement l'une des phases de fonctionnement ci-après :

- une phase de perception et de prise en compte de l'environnement (autres agents, système physique, etc.) complétée par des communications avec les accointances.
- une phase de raisonnement/prise de décision en fonction de rationalités et d'intentions propres. Cette phase conduit au pilotage et à la gestion des centres d'activités auxquels les agents sont reliés, ainsi qu'à la création de décisions et de rationalités pour les agents de niveaux inférieurs.

Ces phases nécessitent deux types de communication distincts :

☒ le premier, qui consiste à représenter les communications entre agents du système en utilisant des messages.

☒ le second, qui permet de transmettre aux centres d'activités la marche à suivre pour leur fonctionnement, ou de communiquer des directives à des agents de niveaux inférieurs, sous la forme de décisions.

Nous faisons donc la distinction entre les « messages » qui vont servir de canal de communication entre agents et qui seront de type informationnel (rationalités, requêtes, ...), et les « décisions » qui sont principalement destinées aux centres d'activités ou aux agents de niveaux inférieurs, et qui représentent des directives.

La différence principale entre les « messages » et les « décisions » est qu'une décision doit être appliquée par l'entité qui la reçoit, alors que le traitement des messages dépend des intentions et rationalités de l'agent.

La coopération se fait à travers un acte volontaire de langage de la part des agents. Pour modéliser cet acte de langage, il faut définir une politique de coopération, c'est-à-dire définir les circonstances qui amènent à l'envoi de messages, le contenu du dialogue, et les participants au dialogue. Cela revient à répondre aux questions : avec Qui communiquer ? Quand communiquer ? Comment communiquer ? et Que communiquer ?

5.1 Avec qui Communiquer ?

La problématique associée aux choix et aux limitations de l'environnement de dialogue peut être résolue, dans notre contexte, à partir des structures organisationnelles définies pour la société d'agents. La figure IV.15 montre un exemple d'organisation dans laquelle on représente deux processus, avec des communications intra et inter-processus.

5.1.1 Entre les niveaux (Hiérarchie)

Les liens hiérarchiques établis par le biais des niveaux de responsabilité entraînent une communication directe entre ces niveaux. Le responsable d'un projet doit pouvoir transmettre ses directives (sous forme de décisions et de rationalités) aux agents des niveaux inférieurs. Par exemple, le responsable d'un processus administratif (de type bureau des méthodes) transmet à un agent le Plan directeur de Planification, ce dernier transforme ce plan à partir d'un calcul des besoins et d'un processus d'ordonnancement en une liste d'ordres de fabrication qui sera utilisée par les agents du processus physique.

5.1.2 A un même niveau (Dépendance)

L'organisation de notre système sous forme de projet, processus et chaînes d'activités entraîne des réseaux de dépendances et des zones de dialogue bien définis.

- Dans une *Chaîne d'Activité* : des liens de dépendances existent entre les agents d'une chaîne d'activité. A titre d'exemple, dans un atelier de fabrication les circuits suivis par les matières (gammes de fabrication) obligent les acteurs concernés à un dialogue continu pour gérer au mieux les stocks intermédiaires et le rendement de leur poste de travail.

- Entre *Processus* : les agents impliqués dans des processus différents sont souvent amenés à négocier pour améliorer leur efficacité. Par exemple au niveau d'un processus administratif, un agent chargé de l'ordonnancement (calcul des tailles des lots de produit, ordre de passage des lots) peut tenir compte de l'avis des agents pilotant les centres d'activité du système physique pour définir ces tailles de lot. Il y a donc négociation et collaboration dans un cadre concerté et orienté par les rationalités et intentions de chacune des deux parties.
- A l'intérieur d'un *Projet* : les responsables des différents processus doivent se concerter et se coordonner pour définir des politiques et des stratégies de fonctionnement harmonieuses et cohérentes pour les chaînes d'activités qu'ils pilotent. Par exemple, s'il y a mise en place d'un système kanban (cf. Annexe A), les agents du processus physique n'ont plus besoin de listes d'ordres de fabrication mais doivent connaître le nombre d'étiquettes à mettre en circulation.

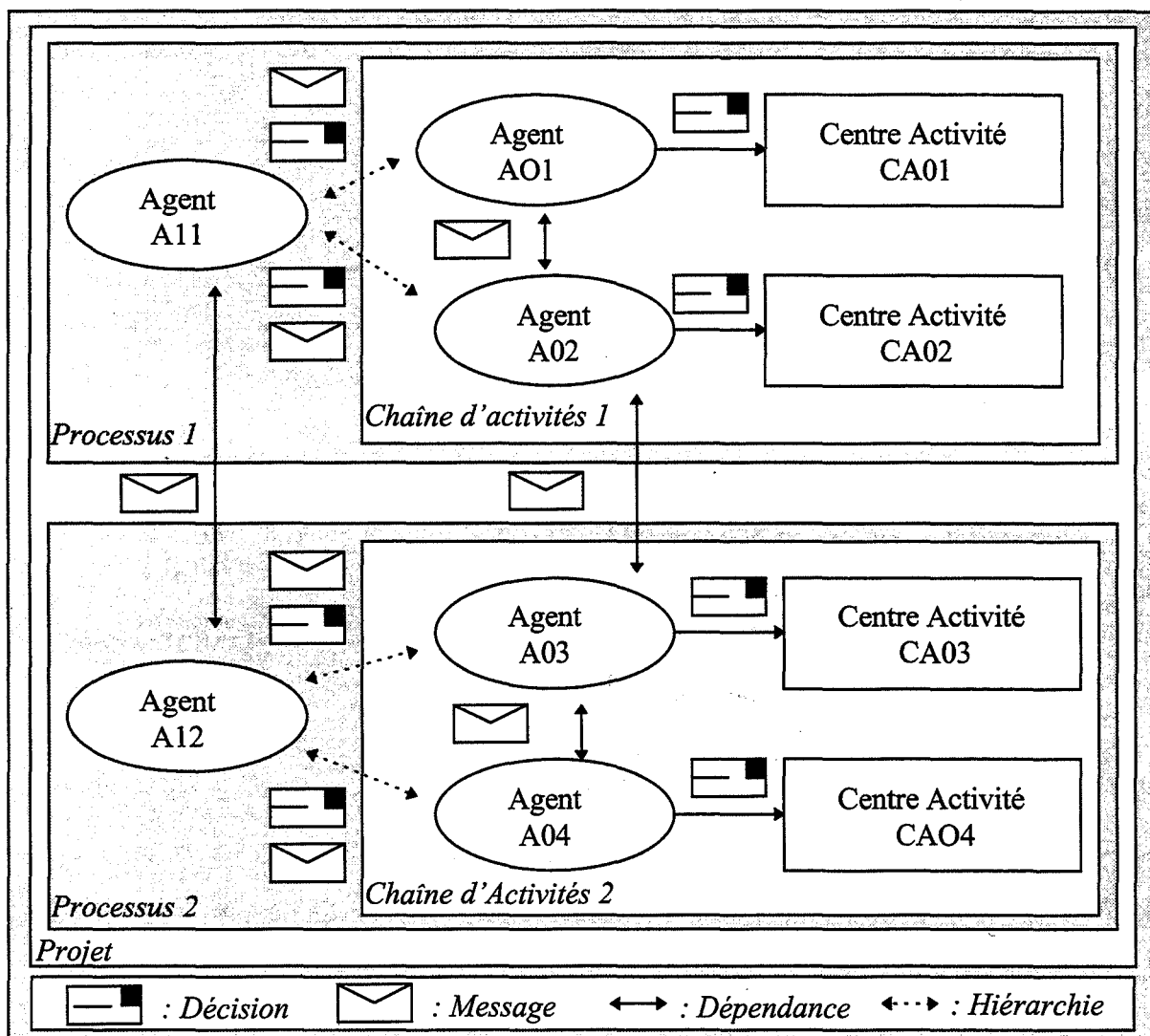


Figure IV.15 « Communications dans l'Organisation »

5.1.3 Dans le cas d'une organisation de type « Effet de Groupe »

Dans ce type d'organisation, il existe des liens évidents de communication entre tous les agents du collectif. De plus, le méta-agent (responsable de la synthèse des interactions et de la prise de décision finale en cas de conflits) doit pouvoir communiquer ses décisions et rationalités (qui fait quoi, quand, objectifs, ...) à chacun des agents concernés.

5.2 Quand communiquer ?

Pour répondre à cette question, il faut identifier les situations (prise de décision, incident, panne, ...) qui vont nécessiter la communication entre agents. La difficulté principale ne réside pas dans l'identification de ces situations, issues des formes de coopération et d'organisations entrevues dans les paragraphes précédents, mais plutôt dans la définition des connaissances qui permettent à un agent de les reconnaître et dans la cohérence des synchronisations entre agents. Pour cela deux voies sont à étudier :

5.2.1 L'activation des mécanismes de prise de décision

Elle consiste à répertorier et caractériser les situations qui vont nécessiter l'activation des processus de raisonnement des agents, et donc de répondre aux interrogations suivantes :

☞ *Quand nos agents vont négocier ?, se concerter ?, piloter les centres d'activités ? ...*

Ces interrogations sont fortement liées à l'objectif de simulation des systèmes de production. En effet, analyser une organisation avant de la modéliser passe par l'étude de la périodicité des prises de décision dans l'entreprise et les liens entre type de décision et horizons d'applications (court, moyen, et long terme). Il est évident que l'on ne peut pas faire n'importe quoi n'importe quand ; la modélisation de l'entreprise à simuler impliquera une définition minimum des règles de fonctionnement de type : heures d'ouverture et de fermeture, périodicité de prise de décision aux différents niveaux, durées opératoires, périodicité de scrutation des stocks, etc. Ces informations font partie de l'analyse de l'organisation et de son modèle de compréhension.

Il suffira donc de définir clairement, dans des scénarios de simulation, un ensemble de paramètres temporels tels que : durée de simulation, fréquence de calcul des besoins (hebdomadaire), ordonnancement (journalier), durées opératoires, scrutation des stocks (heure par heure), etc.

Ces informations serviront de base aux unités de contrôle pour coordonner les activités des différents modules constituant l'agent cognitif. De même, la périodicité de scrutation de la boîte aux lettres par le module de communication, ou celle des indicateurs et variables par le module de perception, sera conditionnée par ces paramètres.

❖ *Quels sont les événements non-planifiables qui vont provoquer une activation des agents ?*

Les actions décisionnelles planifiables mises à part, il faut tenir compte des situations imprévisibles (d'un point de vue temporel) qui vont engendrer des raisonnements cognitifs de la part des agents de l'organisation. A titre d'exemple, des pannes répétées sur une ressource peuvent entraîner une modification de la stratégie (type de produit, quantité à produire, etc.).

Il faut donc prévoir un ensemble d'événements (signaux) particuliers qui feront réagir nos agents. Les traitements associés à ces événements seront activés par le module de perception qui a pour mission de scruter l'environnement des agents. La définition de ces différents événements, et des traitements qui leurs sont associés, sera spécifique à des scénarios productiques qui pourront être validés par la simulation.

5.2.2 La synchronisation entre Agents

La problématique principale quand on s'intéresse aux aspects temporels est de faire le lien entre la phase simulation (discrète) du système physique (pièce sur les machines, transports, panne, etc.) qui représentent des « processus » qui consomment du temps et la phase décisionnelle (raisonnement des agents, concertation, négociation, etc.).

Une fois les situations de prise de décision identifiées, la principale difficulté réside dans le choix d'un modèle de représentation temporelle.

Ces « messages » représentent explicitement les informations et connaissances qui circulent entre un agent cognitif et ses accointances, ils sont divisés en plusieurs classes : les rationalités (évaluatives et structurelles), les requêtes, les réponses et les informations.

La structure générique suivante, va permettre de représenter les différents types de « décisions » et de « messages » :

| | |
|-----------------------------|---|
| Numéro Message : | Chaque message a un numéro d'identification. |
| Agent Expéditeur : | Le nom de l'agent expéditeur. |
| Agent Destinataire : | Le nom de l'agent destinataire. |
| Nature : | La nature du message (décision, rationalité, requête, réponse, etc.). |
| Type : | Le type de message (urgent, prioritaire, normal). |
| Etat : | L'état du message (traité, non-traité). |
| Contenu : | Corps du message. |
| Date : | Date d'envoi du message. |

Figure IV.16 « Structure Générique d'un Message »

A partir de cette structure générique nous allons définir les différents paramètres liés à la nature des messages : le numéro, l'expéditeur, la date et l'état du message sont des données qui ne sont pas liées directement à la nature de la communication. Par contre le destinataire, le type et le contenu sont dépendants de ce que l'on transmet comme informations :

Décision : dans ce cas, le destinataire est soit un « centre d'activité », soit un « agent cognitif », il faudra donc spécifier le numéro du centre (fig. IV.17) ou le nom de l'agent destinataire. Ce type de message est automatiquement « urgent », il faut préciser que les agents cognitifs ne peuvent pas envoyer plusieurs décisions concernant leur centre d'activités à une même date, et ces décisions sont traitées directement par le centre d'activités. Le contenu du message est lié au centre d'activité, c'est-à-dire que selon le processus de l'entreprise dans lequel ils sont, les centres d'activité ont une mission bien précise à effectuer et ont besoin d'informations spécifiques. Ces informations sont à définir au moment de la création du centre d'activité. La nature du traitement pris en charge, et le type de centre d'activités : physique

- ☒ *Une décision* entraîne une mise-à-jour du module cognitif, et l'activation d'un processus de raisonnement avec éventuellement pour objectif de créer une nouvelle décision pour le centre d'activité auquel est rattaché l'agent.
- ☒ *Une rationalité*, qui est en général associée à une décision de niveau supérieur, va engendrer une mise à jour du module cognitif de l'agent.
- ☒ *Une information* : le mécanisme de traitement des informations contrôle celle-ci et, si nécessaire, la place dans le module cognitif de l'agent.

5.4 Que communiquer ?

Cette question appelle une description structurelle et fonctionnelle des éléments qui supportent la communication. Une fois les situations de coopération générant une forme de communication identifiées, et les types de communication requis par ces situations répertoriés, il faut définir les moyens qui vont permettre la mise en oeuvre de ces communications. Ces moyens dépendent évidemment du type de la connaissance et des informations qui vont circuler dans le système, ils sont détaillés dans la partie suivante.

Il y a deux grandes classes de messages qui vont transiter dans notre système :

- la première, qui est la plus simple à formaliser, concerne la transmission des « Décisions » aux centres d'activités et aux agents de niveaux inférieurs. Ce type de communication se limite au passage d'un certain nombre de données (quantité à produire, taille de lot, stocks de sécurité, périodicité de calcul des besoins, etc.).
- la seconde concerne les communications entre un agent cognitif et ses accointances : les messages que vont se transmettre les agents ont un format qui permet d'établir un langage commun à tous les agents. Par l'intermédiaire de ces messages ils s'échangent de l'information, font des requêtes ou y répondent. Au niveau du module de communication et de l'unité de contrôle, il y aura une interprétation du message (détermination du type), une validation (vérification des accointances), l'activation d'un processus de traitement (tâches liées au type) et enfin l'envoi de message (réponse, informations, rationalités).

Deux choix sont possibles :

- une gestion distribuée : chaque agent ayant son temps propre (la synchronisation des agents étant alors assurée par l'intermédiaire des échanges d'informations entre agents).
- une gestion centralisée du temps : qui permet de garantir aisément la cohérence des informations échangées, mais qui va à l'encontre d'une approche véritablement distribuée.

La simulation à événements discrets ajoute aux problèmes classiques de l'approche multi-agents (cf. III.3) des problèmes de dynamique temporelle. En effet il faudra, dans le cas de la simulation, assurer l'évolution en parallèle des agents et assurer la cohérence temporelle des informations échangées avec les différents processus du système qui font également évoluer le temps. Pour cela, nous avons opté pour une solution centralisée de gestion du temps.

Dans la majorité des outils de simulation, la manière la plus simple de faire avancer le temps de façon discrète se fera par le biais d'un échéancier dans lequel sont classés les événements par date croissante d'occurrence. Cet échéancier assurera la cohérence des événements et permettra la description aisée de processus de négociation.

5.3 Comment Communiquer ?

5.3.1 Type de Communication

Le modèle principal que nous utilisons pour décrire les communications entre agents est basé sur l'envoi de message, c'est-à-dire que chaque agent possède une boîte aux lettres dans laquelle sont stockés les différents messages à traiter. On associe à cette boîte aux lettres une méthode de classification, fonction du niveau d'importance (principalement trois niveaux : urgent, prioritaire et normal), et d'interprétation des messages.

Chaque agent cognitif reçoit deux types de messages :

☒ Les messages *synchrones* : correspondent à des messages qui ne transitent pas par la boîte aux lettres, ils donnent lieu à des réponses immédiates. Par exemple, s'informer de la valeur d'une connaissance publique (attribut) d'un agent se fait directement par envoi de messages.

☒ Les messages *asynchrones* : dont l'action correspondante prend du temps, ou doit être faite avec un certain délai. Ils sont marqués de leur date d'occurrence et sont gérés par le système de gestion (interprétation) de la boîte aux lettres propre à chaque agent.

5.3.2 Mode de diffusion

Pour faire parvenir les messages d'un agent à ses accointances nous utiliserons les deux modes de communication communément utilisés :

- le mode « Point-à-Point » : dans lequel on cite explicitement le destinataire, cela permet d'envoyer un message à un agent particulier.
- le mode « Diffusion » : l'envoi de messages se fait à un groupe d'agents. Ce type de diffusion est très utilisé dans les SMA où il y a création dynamique d'agents, mais il sert également à transmettre des informations à tous les agents avec lesquels il existe un lien.

5.3.3 Interprétation des messages

Lorsqu'un agent reçoit un message, le module de communication l'interprète et le classe dans la boîte aux lettres. Il signale son arrivée à l'unité de contrôle qui va déclencher un processus de raisonnement. Ce processus va dépendre du type du message.

☒ *Une requête* : la requête est associée à un type de problème. Les stratégies de raisonnement (ensemble de règles et de traitements) traitant les problèmes sont activées et une réponse (résultat d'un calcul, lecture d'une donnée, etc.) est obtenue puis transmise.

☒ *Une réponse* : le mécanisme (règles) responsable du traitement des réponses, traite (si nécessaire) l'information obtenue et l'insère dans le module cognitif.

(fraisage, usinage, transport, etc.) ou administratif (calcul des besoins, ordonnancement, etc.), nécessitent un ensemble de données sur l'environnement et sur les règles de fonctionnement qui seront fournies par l'agent cognitif.

```

AgentA : Envoyer : message(xxx, CentreActivité11);

message (xxx) :   Numéro :   « xxx »,
                  Expéditeur : « AgentA »,
                  Destinataire : « CentreActivité11 »,
                  Nature :     « Décision »,
                  Type :       « Urgent »,
                  Etat :       « Non Traité »,
                  Contenu :     « Taille de Lot = 50
                                Stock de Sécurité = 20 »,
                  Date :       « hh/mm/ss ».
```

Figure IV.17 «Exemple de Message : Décision »

Rationalité : les rationalités (fig. IV.18), dont le contenu est composé de deux types d'informations : une rationalité évaluative et une rationalité structurelle, constituent un type particulier d'information. Elles sont liées à la structure de représentation hiérarchique de l'organisation, c'est-à-dire qu'elles sont transmises d'un niveau de décision à un autre par les agents cognitifs. Le destinataire est donc obligatoirement un agent avec lequel il existe un lien de type hiérarchique. Le message est de type « normal » car ce genre de communication (un changement de rationalité) se fait périodiquement et de manière assez réfléchie.

```

AgentA1: Envoyer : message(xxx, Agent02);

message (xxx) :   Numéro :   « xxx »,
                  Expéditeur : « AgentA1 »,
                  Destinataire : « AgentA02 »,
                  Nature :     « Rationalité »,
                  Type :       « Normal »,
                  Etat :       « Non Traité »,
                  Contenu :     « RE : évaluation du poste au rendement,
                                RS : Modification de l'ordre des OF possible»,
                  Date :       « hh/mm/ss ».
```

Figure IV.18 : «Exemple de Message : Rationalités »

Requête / Réponse : en ce qui concerne les requêtes (fig. IV.19), les destinataires sont essentiellement les accointances de l'agent expéditeur. Le type de message peut être « urgent », « prioritaire » ou « normal », ce qui entraînera une classification particulière dans la boîte aux lettres, et un traitement ad-hoc, de la part de l'agent receveur. Le contenu est spécifique à partir du moment où le message est interprété comme étant une requête, c'est-à-dire que la syntaxe du contenu est relative au processus dans lequel se trouve l'agent. Et un certain nombre de possibilités (problèmes associés aux requêtes) sont définies lors de la création des agents et de la spécification des liens.

Les requêtes peuvent être synchrones (accès direct à une donnée publique d'un agent), ou asynchrones, c'est-à-dire que l'expéditeur de la requête poursuit ses activités en attendant la réponse. Les requêtes sont de type avec ou sans acquittement (le choix de la réponse est lié aux intentions et aux rationalités de l'agent).

| | |
|---|--|
| AgentA : | |
| Envoyer : <i>message</i> (xxx, AgentB); | |
| <i>message</i> (xxx) : | Numéro : « xxx », Expéditeur : « AgentA », Destinataire : « AgentB », Nature : « Requête », Type : « Prioritaire », Etat : « Non Traité », Contenu : « Quantité en stock produit A », Date : « hh/mm/ss ». |
| AgentB : | |
| Interpréter : <i>message</i> (xxx); | |
| Envoyer : <i>message</i> (yyy, AgentA); | |
| <i>message</i> (yyy) : | Numéro : « yyy », Expéditeur : « AgentB », Destinataire : « AgentA », Nature : « Réponse », Type : « Prioritaire », Etat : « Non Traité », Contenu : « Sock produit A = 50 », Date : « hh/mm/ss ». |

Figure IV.19 «Exemple de Messages : Requête / Réponse »

Information : les messages informationnels classiques représentent des renseignements que transmet un agent à un ou à l'ensemble des agents qui forment ses accointances. Ils sont soit « prioritaires », soit de type « normal ». En effet, les informations transmises ne doivent pas interrompre les processus en cours. S'il y a une urgence l'information doit être envoyée sous forme de requête. Ainsi, les processus d'interprétation de messages pourront traiter ces informations en fonction d'un certain nombre de règles et d'heuristiques (fig. IV. 20).

```

AgentA :
Envoyer : message(zzz, TousAgents);
TousAgents : « AgentB, AgentC, AgentA1 »
message (zzz) :   Numéro :   « zzz »,
                  Expéditeur : « AgentA »,
                  Destinataire : « TousAgents »,
                  Nature :      « Information »,
                  Type :        « Normal »,
                  Etat :         « Non Traité »,
                  Contenu :      « La machine x est souvent en panne »,
                  Date :         « hh/mm/ss ».
    
```

Figure IV.20 «Exemple de Messages : Information »

6 LA RESOLUTION DE CONFLITS

De manière générale, nous considérons que les agents sont coopératifs et n'ont pas de relation d'opposition ou de haine envers autrui. La prise de décision va émerger d'un faisceau d'interactions coopératives plutôt que compétitives entre agents. Les agents sont impliqués dans un environnement dominé par des impératifs d'organisation et de fonctionnalité, et ils sont liés par un contrat social de type « rousseauiste » où prime la notion d'intérêt général. Malgré tout, des conflits peuvent surgir dès lors qu'un agent négocie avec l'un de ses pairs, il est important de prévoir un mécanisme capable de les gérer et de prendre la décision finale.

Ce mécanisme a été introduit au niveau de la présentation de l'organisation de la société d'agents, en effet nous avons parlé de la structuration de type « Effet de Groupe ». Les échanges inhérents à tout processus concerté entraînent la nécessité de représenter un ensemble de méta-connaissances et de méta-règles qui vont permettre de juger et de trancher lors des conflits dus à des incompatibilités. Par exemple, dans un atelier de production si les agents sont jugés au rendement (occupation des machines, production maximum), ils ne pourront pas

optimiser leur production sans se concerter avec les agents en amont et en aval de leur poste (de manière à avoir suffisamment de stock) et opter pour une stratégie commune, or ce type de concertation est souvent conflictuel.

Les méta-connaissances et méta-règles vont permettre de définir des stratégies en fonction de scénarios de négociation prédéfinis. Pour les représenter nous considérerons un agent cognitif de méta-niveau, c'est-à-dire qui ne réagira qu'à des situations de groupe de communication (il sera activé par un agent de niveau supérieur qui coordonne le collectif). Et qui aura la même structure que les agents cognitifs, mais avec des connaissances sur les connaissances du domaine, et des règles de niveau méta.

Ces connaissances seront formalisées dans l'agent au moment de sa création (comme pour tous les agents cognitifs), cela veut dire que les situations conflictuelles et les prises de décisions collectives devront être prévues, et que les connaissances supplémentaires qu'apportera le méta-agent devront être suffisantes à la résolution des problèmes qui pourront survenir. Un exemple de « Méta-Agent » sera détaillé dans les chapitres suivants.

7 CONCLUSION

Le modèle de représentation à base d'agents présenté dans ce chapitre offre des solutions à la problématique d'organisation et de prise de décision décrite dans les deux premiers chapitres. En effet, les concepts associés aux systèmes multi-agents ont permis de concevoir et de formaliser une société d'agents cognitifs issue du modèle de compréhension *Méta*² qui tient compte des phénomènes d'orientation de la prise de décision (intentions, rationalités, connaissances, ...) des acteurs décisionnels de l'entreprise.

L'architecture ainsi définie permet d'intégrer une dimension cognitive au modèle de compréhension et d'étudier les interactions et les communications entre agents du système. Nous allons maintenant décrire les techniques informatiques utilisées pour à la fois implémenter cette société d'agents, et représenter les différents composants de l'organisation productive. ce qui permettra d'étudier le comportement global de cette organisation.

CHAPITRE V

LE MODELE DE SIMULATION

Après une description des techniques d'implémentation choisies, nous présenterons dans ce chapitre une architecture multi-agents pour la simulation d'organisations productives. Cette architecture sera bâtie dans un environnement de programmation objets proche des modèles d'acteurs.

CHAPITRE V

1 INTRODUCTION

La nécessité de formaliser les systèmes multi-agents n'est pas en soi une nouveauté, mais par rapport à des travaux axés sur des concepts théoriques (organisation, société, coopération, etc.), nous plaçons la formalisation dans une perspective opérationnelle, afin de permettre l'implémentation d'une plate-forme générique de développement de SMA pour la simulation de systèmes de production.

Les réalisations informatiques sont particulièrement intéressantes en IAD, car elles permettent d'observer les systèmes dans leur dynamique et elles invitent les concepteurs à penser leurs systèmes selon des processus d'interaction et d'organisation. Nous pensons que le manque de logiciels mettant en oeuvre des agents coopératifs est principalement dû à la difficulté de programmer des agents, particulièrement dans leurs aspects sociaux et dans leurs capacités à communiquer et à s'organiser.

L'élaboration de nouveaux outils d'implémentation n'est pas l'objectif premier de cette étude ; cette dernière s'attache plus spécifiquement aux problèmes de modélisation de société d'agents, et à l'adéquation de cette approche à la simulation de la prise de décision distribuée dans les organisations productives. C'est pourquoi la recherche d'outils d'implémentation proposée ici n'a pas comme but de déterminer le langage idéal d'implémentation de modèles dynamiques distribués, mais plutôt de trouver des outils satisfaisants, permettant d'aborder l'ensemble des spécificités d'un modèle multi-agents pour la simulation avec la plus grande efficacité. Elle doit permettre ainsi d'illustrer l'importance que peuvent avoir l'IAD et les SMA dans la représentation de la dimension cognitive de la prise de décision dans les organisations.

Nous allons donc débiter ce chapitre par le choix d'un modèle d'implémentation, puis en fonction de la problématique liée à la simulation à événements discrets, nous verrons quel type d'outils d'implémentation nous avons choisi. Une dernière étape consistera à mettre en oeuvre ces outils pour construire un modèle de simulation issu des modèles de compréhension et de représentation à base d'agents.

2 ENVIRONNEMENT DE DEVELOPPEMENT

Les modèles les plus utilisés à l'heure actuelle pour implémenter des systèmes multi-agents sont répartis dans trois grandes familles, qui souvent cohabitent :

- Les systèmes à base de tableaux noirs (blackboard) : qui permettent une communication entre agents (sources de connaissances) par le biais d'une base de connaissance commune (BB1 [Garvey et al. 86], Hearsey-II [Erman et al. 80], ...)
- Les modèles d'Acteurs : qui représentent des entités actives et autonomes. Ils ne sont pas uniquement conceptuels, ils fournissent un modèle intéressant pour l'implémentation (Actalk [Briot, 89], MAGES IV [Carle, 92], ...) dans lequel la communication se fait par envoi de messages.
- Les langages à objets concurrents : ce sont en règle générale des extensions de langages à objets classiques auxquels ont été intégrés des mécanismes de parallélisation et de synchronisation ([Agha, 88], [Agha, 93], [Cardozo, 93], ...).

2.1 Modèle Adopté

Le modèle de représentation à base d'agents décrit dans le chapitre précédent influence fortement le choix de notre modèle d'implémentation. En effet, la mise en place de communications par envoi de messages, et plus globalement, l'architecture des agents cognitifs génériques (distribution du contrôle, interactions avec les centres d'activités, ...) font que nous avons implicitement choisi un modèle proche des acteurs ou des objets actifs.

En effet, nous avons préféré ce type de modèle aux systèmes à base de tableaux noirs, et ceci pour différentes raisons :

❶ *Des raisons d'ordre général :*

- Les systèmes à base de blackboard ont suscité beaucoup de critiques à cause du caractère centralisateur des mécanismes de contrôle, problème que les blackboards distribués et parallèles essayent de corriger. De plus, ces mécanismes sont généralement complexes et coûteux en temps d'exécution.
- Les blackboards sont souvent saturés en terme de stockage d'informations.
- Dans un environnement distribué on ne peut pas toujours disposer d'une mémoire commune. Hewitt et Libermann [Hewitt et Libermann, 84] considèrent que pour des applications réelles, l'utilisation d'un seul blackboard est impossible, et dès lors que plusieurs sont présents on retrouve la notion d'échange de messages.
- Il semble que l'envoi de message offre un moyen de communication plus efficace [Decker, 87] et plus riche qu'un simple partage de mémoire.

❷ *Des raisons spécifiques à notre problématique :*

- Le modèle de compréhension (cf. II.4.2) fait référence à un emboîtement de modules pour représenter les différents niveaux de l'entreprise, et permet de définir différents types d'organisations. Il semble délicat de concevoir des structures de données, communes pour tous les agents, qui soient génériques et qui s'adaptent aux différentes structures organisationnelles (hiérarchie, dépendance, et effet de groupe) proposées.
- Les agents cognitifs pilotent des centres d'activités qui représentent des processus opérationnels (physique ou administratif) de l'entreprise, et qui sont eux mêmes des processus actifs (au sens temporel du terme). Il faut donc avoir la possibilité de gérer non seulement la cohérence des interactions entre agents, mais également le pilotage des centres d'activités par ces agents et leur synchronisation. L'envoi de message semble être le meilleur moyen de modéliser ces actions de pilotage.

- L'intérêt principal, dans le contexte de la prise de décision distribuée dans les organisations, est d'étudier les comportements des différentes entités par rapport à leurs nombreuses interactions (processus de négociation, coopération, conflits,...). Modéliser naturellement ces processus de négociation revient à utiliser des actes de langages [Bouron, 93], qui ne peuvent être réellement cohérents que par l'utilisation de modes de communications directes.
- Dans notre contexte, les échanges entre agents sont limités aux accointances, ainsi on limite fortement le stock d'informations communes à l'ensemble de la société d'agents.

Mais l'une des raisons principales qui justifie notre choix est liée à l'avènement des méthodes et environnements de programmation concurrents basés sur des objets dédiés à l'IAD [Bouron, 93], [Maruichi, 89], [Briot, 89], ... En effet, nous verrons que les efforts de recherche dans le domaine des langages concurrents orientés objets ([Caromel, 93], [Agha, 93], [Cardozo, 93], [Carle, 92], [Boulanger, 94] ont permis de nombreuses implémentations de systèmes à base d'objets dans lesquelles un enrichissement des concepts temporels (horloge locale), une représentation des connaissances, un contrôle distribué, etc. ont été proposés.

2.2 Le Concept d'Objet Actif

La modélisation par objets conduit à décomposer un système en classes d'objets [Masini et al. 89]. Un modèle orienté objet d'un système distribué peut être vu comme un ensemble d'objets, pouvant être actifs simultanément et communiquant les uns avec les autres au moyen de messages. En fait, il apparaît que la concurrence est une conséquence naturelle du concept d'objet, elle repose sur le potentiel d'exécution parallèle de parties de calculs.

Le mode de communication par messages proposés dans Smalltalk (langage de programmation orienté objets) par Alan Kay peut supporter le fonctionnement en parallèle de plusieurs processus communicants [Bezivin, 87], mais c'est avec Simula (langage de simulation) [Dahl, 66] que des classes d'objets ont été pour la première fois utilisées pour représenter des activités distribuées et concurrentes. Pour cela, les processus de Simula sont prévus pour tous s'exécuter sur le même processeur séquentiel, on parle de quasi-parallélisme avec la notion de

coroutines (*processus*) [Hill, 93] [Akerbaek, 93]. Il s'agit du mécanisme le plus simple qui soit pour simuler la concurrence à partir d'un seul processeur ; chaque coroutine se partage le processeur central à tour de rôle, les données sont partagées et les communications ne sont pas limitées. Cette technique est très simple à implémenter et ne nécessite que quelques fonctions en langage d'assemblage pour effectuer les changements de contexte de manière efficace.

2.2.1 Un Modèle d'Acteur à base d'Objets Actifs

Un rapprochement immédiat peut être fait entre les objets et les acteurs. Un objet, tel qu'il est défini par les langages à objet, peut être perçu comme une entité interagissant avec d'autres par envoi de message. La différence principale réside dans la notion d'autonomie associée aux procédés de communication.

L'envoi de messages dans la plupart des langages à objets est assimilable à un appel de fonction. L'objet, « être » passif, est activé par un émetteur qui lui envoie un message lui indiquant ce qu'il doit faire. La communication est séquentielle, un seul objet est actif à la fois. Tant que le receveur n'a pas fini d'exécuter l'action pour laquelle il a été sollicité, l'émetteur est en attente. Dès lors, l'objet est perçu comme un simple prestataire n'ayant ni existence propre ni autonomie. L'acteur est réellement un « être » actif et autonome pour lequel la communication devient une activité importante. Il sépare la réception des messages de leur interprétation. Il filtre les messages qu'il reçoit et adapte l'attitude qui lui convient en fonction du contexte (choix des procédures, délégation, etc.).

Le modèle d'acteurs proposé par Briot [Briot, 89], qui a donné lieu à la réalisation du langage Actalk, est le premier à s'inspirer d'un langage à objet (Smalltalk [Goldberg et al 83]). Pour cela il y a eu transformation des objets (éléments passifs, activés de manière synchrone par des messages) en éléments actifs (qui encapsulent un processus), communiquant par messages asynchrones.

Un acteur d'Actalk (fig. V.1) est composé d'une *partie objet* (ensemble d'attributs et de méthodes qui décrivent les connaissances et les comportements de l'acteur) et d'une *boîte aux lettres* (pour gérer les messages asynchrones). Il est animé par un *processus* Smalltalk

[Bezivin, 87], qui détermine son état (suspendu ou éligible). Il est dans l'état suspendu lorsque la boîte aux lettres de l'acteur est vide et devient éligible lorsque l'acteur reçoit un message. Un mécanisme de régulation (*scheduler*) produit une répartition de l'activation des processus. Il choisit aléatoirement un acteur parmi les acteurs éligibles et interprète au moins un des messages contenus dans sa boîte aux lettres avant d'activer un autre acteur. Lorsqu'un message est interprété, la méthode correspondant au sélecteur des messages (définie dans la partie objet de l'acteur) est exécutée. [Briot, 89]

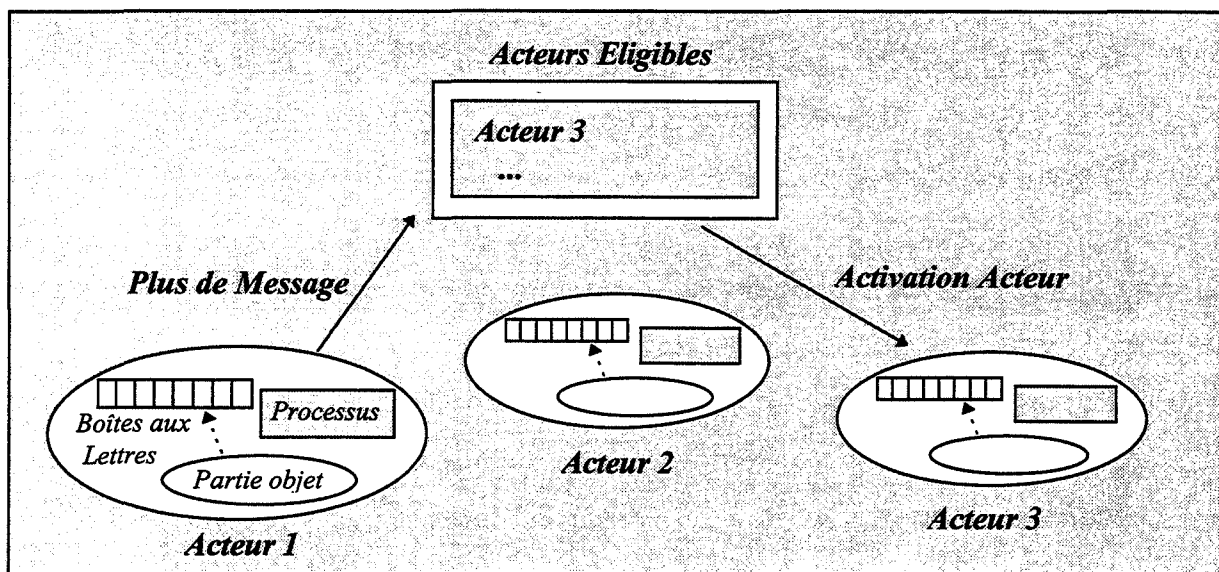


Figure V.1 « Le Modèle d'exécution d'Actalk »

Actalk est un exemple intéressant d'implémentation de modèles d'acteurs à partir de concepts d'objets actifs. L'intérêt principal du langage Actalk est qu'il cumule les avantages des fondements théoriques des modèles d'acteurs pour la conception de systèmes multi-agents, et les avantages présentés par un environnement évolué orienté objets.

La similitude entre objets et acteurs (en tant que techniques d'implémentation d'agents) a poussé Shoham [Shoham, 93] à parler de « Programmation Orientée Agents ».

2.2.2 Des Objets aux Agents

On reproche, souvent injustement à l'objet [Boulanger, 94] :

- son manque de réactivité,
- l'absence de communication asynchrone,
- son inadaptation pour modéliser la distribution (au sens distribution de compétences),
- son incapacité à agir à la suite d'un raisonnement (système de décision).

Des réserves plus justifiées concernent :

- la représentation que possède l'objet de lui même et de son environnement (y compris les autres objets),
- la complexité de la définition et de l'implémentation de processus de finalisation qui donneraient à l'objet une totale autonomie de comportement (dépassant le simple schéma stimuli-action),
- la plus ou moins bonne capacité de l'objet pour représenter une base de connaissances notamment pour assurer son évolution (révision de croyances) et sa cohérence.

Un modèle d'implémentation orientée objets répondant aux principes fondamentaux des agents doit donc :

- Transformer les objets en objets actifs (qui encapsulent des processus).
- Prendre en compte l'asynchronisme des événements : cela peut se faire comme dans les langages d'acteurs, au moyen d'une boîte aux lettres et d'un gestionnaire de boîte.
- Définir des types de messages, et des protocoles de communication.
- Permettre une représentation des connaissances (croyances, intentions, compétences, etc.) et des mécanismes de traitements adéquats (procédures, règles de production, etc.).
- Intégrer un mécanisme de régulation qui permettra l'activation en parallèle de chaque agent, et de vérifier la cohérence de leurs évolutions temporelles.

Nous allons tenter, dans les paragraphes suivants, d'apporter des réponses à ces enrichissements proposés pour les objets. Pour cela, nous allons faire un rapprochement entre les spécificités définies par le langage Actalk [Briot, 89] (à base d'objets), et les fonctionnalités fournies par une librairie d'objets actifs (C++) SIM_PP pour la simulation à événements discrets.

2.3 Technique d'Implémentation

2.3.1 Solution Choisie

Dans le chapitre II, une présentation de la simulation des systèmes à événements discrets a été faite. Nous avons vu que parmi quatre approches existantes (par cycle d'activités, par événements, par processus, et par objet) l'approche par objets présente un certain nombre d'avantages indéniables, et tente de répondre au mieux aux objectifs des logiciels de simulation qui sont d'être plus proches des besoins des utilisateurs, plus faciles à utiliser et à maintenir, et plus performants. De plus les concepts objets peuvent fournir une méthodologie (qui fait cruellement défaut à l'heure actuelle) de modélisation, de conception, et d'implémentation aux utilisateurs de modèles de simulation.

Les recherches menées actuellement, et qui tentent d'appliquer les technologies objets, s'orientent dans de nombreuses directions : méthodologie de conception de modèles de simulation, réutilisabilité des modèles, graphisme et animation, programmation concurrente, pilotage et modèles distribués, etc.

La simulation à événements discrets nécessite une synchronisation de processus (fabrication, transport, panne, etc.), une gestion dynamique des ressources, l'intégration de processus de pilotage et de contrôle, etc. L'implémentation des SMA, induit la possibilité d'avoir des entités autonomes, communicantes (communications asynchrones), avec une représentation des autres agents, des intentions propres, des rationalités, etc.

Une association de ces deux problématiques nous pousse à utiliser des concepts informatiques fédérateurs, en l'occurrence les concepts issus du paradigme d'objet actif. Pour cela, en nous basant sur les spécificités définies par le langage Actalk et sur les fondements théoriques concernant le passage des objets aux agents, nous avons opté pour un environnement de développement orienté objets issu des techniques de simulation à événements discrets.

Cet environnement est constitué d'une bibliothèque de classes d'objets C++ (SIM_PP [Rose, 92] présentée en annexe B) basée sur la simulation orientée processus pour les systèmes

à événements discrets. Pour ce faire, elle s'appuie sur deux concepts fondamentaux liés à la concurrence dans les applications informatiques :

↳ *La notion de « processus »* : un processus, entité essentiellement dynamique, met en oeuvre de manière séquentielle une ou plusieurs procédures de traitement, en vue de la réalisation d'une activité. Les activités se déroulent dans un laps de temps prédéfini, et peuvent être créées, exécutées, interrompues, ou détruites.

↳ *La notion de « régulateur »* : le régulateur est le chef d'orchestre d'un modèle de simulation, il effectue le choix d'un processus parmi n processus éligibles. Ces fonctions principales sont :

- La gestion du temps consommé par les processus,
- Le choix d'un processus, parmi les processus activables à un temps t , en respectant un ordre de priorité temporel.

Sur ces points, SIM_PP s'inspire des travaux qui ont abouti au logiciel de simulation orientée objet MODSIM-II, qui est basé sur la notion de « Threads ». Un « Thread » (une abstraction de « light weight process » qui sert à implémenter les *processus*) nommé PROCESS dans SIM_PP est une fonction d'un programme C++ s'exécutant en parallèle avec le programme principal (fonction main). La librairie associée aux PROCESS offre deux types de services : la gestion des PROCESS (création, suppression, interruption), et leur synchronisation (par sémaphore, sections critiques (exclusion mutuelle), variables de condition, etc.).

La notion centrale en SIM_PP est le script dans lequel le comportement (contenu de la méthode PROCESS) est défini. Un comportement est associé à un objet lors d'une opération « new Object ». Le script (PROCESS) est une fonction virtuelle, ceci impose sa redéfinition dans les classes dérivées (définition des scripts utilisateurs). Un objet actif de ce type peut donc changer de comportement dynamiquement de la même manière que pour les acteurs.

D'autres classes d'objets indispensables à la simulation telles que les générateurs de nombres aléatoires, les classes d'analyse statistiques, et les représentations graphiques des résultats sont également définies.

2.3.2 Justification

Dans le paragraphe précédent 2.2.2 « Des Objets aux Agents », nous avons décrit les enrichissements nécessaires à apporter aux objets pour qu'ils puissent implémenter efficacement des agents :

↳ Les deux premiers d'entre eux concernent le comportement des objets et la nécessité de pouvoir obtenir une certaine autonomie de la part des objets et une asynchronisation de leur évolution. Le langage que nous utilisons (la bibliothèque C++ SIM_PP) est basé sur la notion d'objets actifs. Comme nous l'avons vu dans les paragraphes précédents, ces concepts ont été utilisés pour définir un langage à base d'acteur (Actalk) et permettent de définir un modèle d'exécution basé sur les interactions entre des entités autonomes.

↳ Le troisième point est relatif au langage de communication. SIM_PP permet de construire des zones de stockage (boîtes aux lettres) et de les gérer de manière asynchrone. En ce qui concerne les protocoles de communication, nous avons défini dans le chapitre IV, un ensemble de messages (décision, requête, information, rationalités,...) qui constituent un modèle minimal de communication, et qui sera implémenté relativement simplement à partir de classes d'objets.

↳ En ce qui concerne la représentation des connaissances qui constitue le quatrième point, nous verrons que les objets sont aptes à manipuler un ensemble de bases de connaissances, les faits sont représentés par des attributs de classes et les règles sont des règles de production classiques, et ceci en utilisant un mécanisme d'inférence.

↳ Le cinquième point, relatif au mécanisme de régulation du système, sera constitué dans notre application par le « régulateur » défini par la bibliothèque. Il sera responsable de l'activation de tous les processus (centres d'activités et agents cognitifs), de leur synchronisation, et du maintien de la cohérence du système.

↳ Un dernier point concerne la prise en compte du temps dans la logique de raisonnement des agents. La simulation est un bon moyen pour évaluer (en fonction d'indicateurs, de statistiques, etc.) l'importance des retards dans la prise de décision. La structure définie pour les « agents cognitifs » permet de prendre en compte ce facteur temps de raisonnement, mais aussi de modéliser une réaction « temps réel » aux changements d'état des centres d'activités et de leur environnement.

3 LE MODELE DE SIMULATION

Pour présenter le modèle de simulation, à partir des fondements théoriques (modèle de compréhension et modèle de représentation agent) et des techniques d'implémentation, nous allons nous focaliser sur les principaux composants d'une organisation productive.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre II, les éléments du modèle de simulation à implémenter sont de quatre types. Les « Entités de Transaction », les « Moyens de Production », les « Centres d'Activités », et les « Agents Cognitifs ».

Les trois premiers types sont directement liés à la problématique de modélisation des systèmes de production et, pour les représenter, nous allons nous inspirer des travaux de Kellert [Kellert, 92] et Hill [Hill, 93] sur l'analyse et la conception orientée objets pour la modélisation des systèmes de production, et sur la méthode OMT [Rumbaugh, 91] pour le formalisme et les différentes étapes à suivre.

En ce qui concerne les agents cognitifs, nous allons décrire la manière dont ils ont été implémentés (objets actifs) à partir du modèle de représentation (cf. IV.4), et les structures et formalismes qui vont servir l'organisation, la coopération, et la gestion des différents centres d'activités.

3.1 Le Processus de Modélisation Objets

Le processus de modélisation par objets que nous utilisons est dérivé des cycles définis pour la création de logiciels classiques et reprend les concepts du processus de modélisation (fig. V.2) (compréhension, représentation agents) de systèmes de production proposé, ce qui permet de se placer dans le cadre général de la création de logiciels, en prenant en compte les spécificités de la simulation et l'intégration de concepts cognitifs.

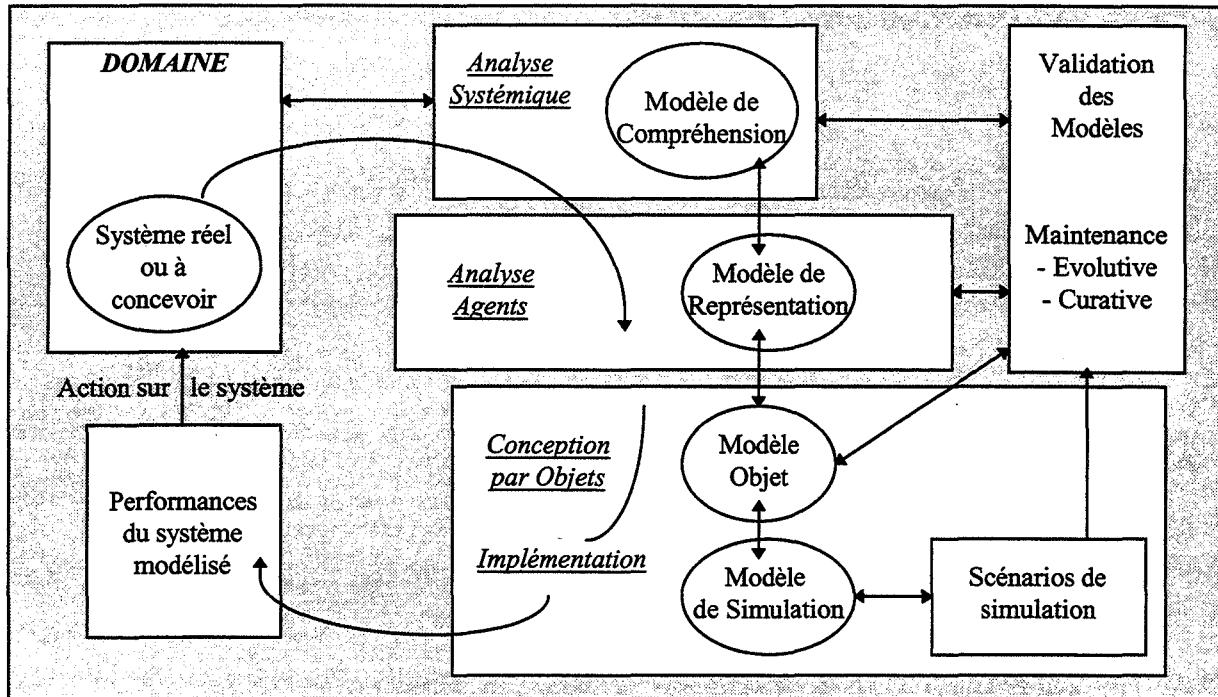


Figure V.2 « Processus de Modélisation »

Dans notre étude, l'analyse du domaine est le résultat des modèles de compréhension et de représentation dans lesquels nous avons décrit, dans un premier temps l'organisation et les fonctionnalités des différents composants d'une organisation productive, et dans un second temps un modèle intégrant des concepts d'IAD pour représenter au mieux la prise de décision dans sa dimension cognitive. Nous allons maintenant identifier les classes d'objets résultantes de ces modèles et les détailler.

La conception par objet est une méthode utilisée pour identifier les entités significatives réelles ou conceptuelles d'un système, et pour comprendre et expliquer comment ces entités interagissent afin de réaliser les objectifs visés par les utilisateurs [Shlear et al, 92]. Cela revient à identifier les objets ou les services d'un ensemble de systèmes similaires pour un domaine d'application.

La présentation globale du modèle se fera en trois parties, la première concernant les entités de transaction et moyens de production, la deuxième les centres d'activités, et la dernière sera spécifique aux agents cognitifs.

3.2 Les « Entités de Transaction » et les « Moyens de Production »

Les entités de transaction (cf. II.4.2.1) représentent des entités qui n'ont pas de comportement propre et ne consomment pas de temps (en terme de simulation) : ce sont des objets « passifs » qui vont être créés, manipulés, et détruits par des objets « actifs ». Les moyens de production sont les ressources physiques qui vont être utilisées par les centres d'activités pour mettre en oeuvre leurs différents processus.

↳ Les « **Entités de Transaction** » : représentent l'ensemble des flux physiques (pièces, composants, produits finis, matières premières, etc), et informationnels (gammes, ordres de fabrication, opérations, nomenclatures, etc.), qui vont circuler dans le système et être utilisés dans les différents processus (physique et administratif).

↳ Les « **Moyens de Production** » : correspondent à l'ensemble des ressources utilisées par le système. Il y en a de trois types :

- Les ressources principales (machines, transporteurs,...) : sont des ressources physiques opérationnelles qui vont supporter les processus en cours. Elles seront modélisées sous forme d'objets actifs. Leur comportement (unique) se réduira à un mécanisme de gestion de deux états : disponibles ou indisponibles, en fonction d'attributs spécifiques concernant les pannes (« Mean Time Between Failure » et « Mean Time To Repair »).

- Les ressources secondaires (outils, outillages,...) sont des objets passifs qui viennent se greffer ponctuellement à des processus et sont utilisables par différentes ressources principales.

- Les stocks : ce sont également des objets passifs qui vont représenter aussi bien les stocks intermédiaires (files d'attente de matières) que des centres de stockage (magasins).

Pour déterminer l'ensemble de ces entités nous nous sommes basés sur le modèle de compréhension défini dans le chapitre II, mais également et comme complément d'analyse, sur un modèle conceptuel de données global (fig.V.3) de type Entité/Association, utilisé en gestion de production [Pierreval, 90].

Il faut signaler que ce modèle conceptuel des données vient en complément de notre modèle de compréhension car il permet de décrire précisément les constituants du système de production, alors que le modèle de compréhension spécifie particulièrement l'organisation et les mécanismes de prise de décision.

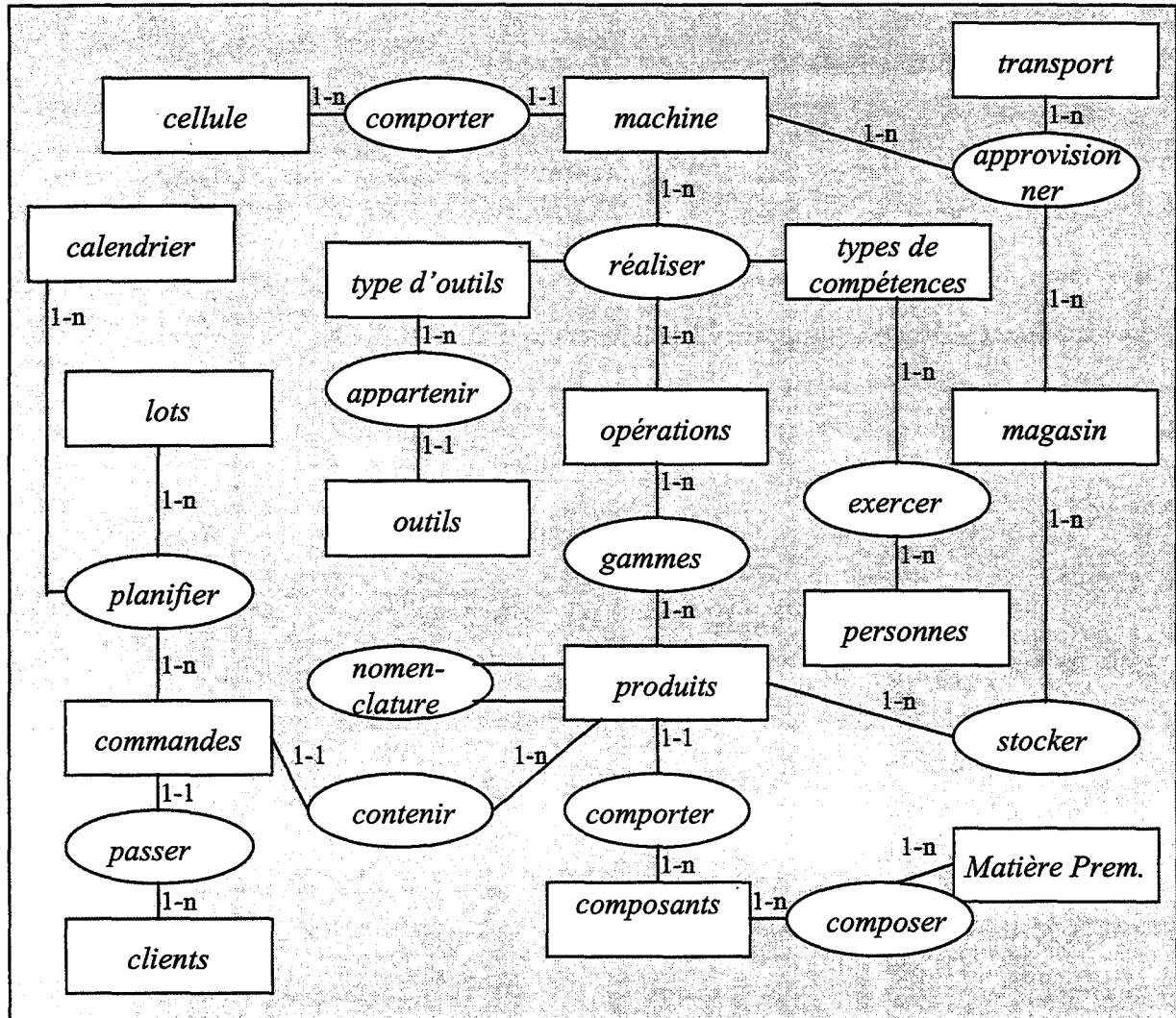


Figure V.3 « Modèle Entités/Associations pour la Production »

A partir de ce modèle, nous pouvons définir les différentes classes d'objets de type « Entités de Transaction » et « Moyens de Production », et spécifier les liens de composition et d'agrégation propres aux langages orientés objets (passage d'un modèle entité/association à un modèle objet [Rochfeld, 93]), par exemple (fig. V.4) :

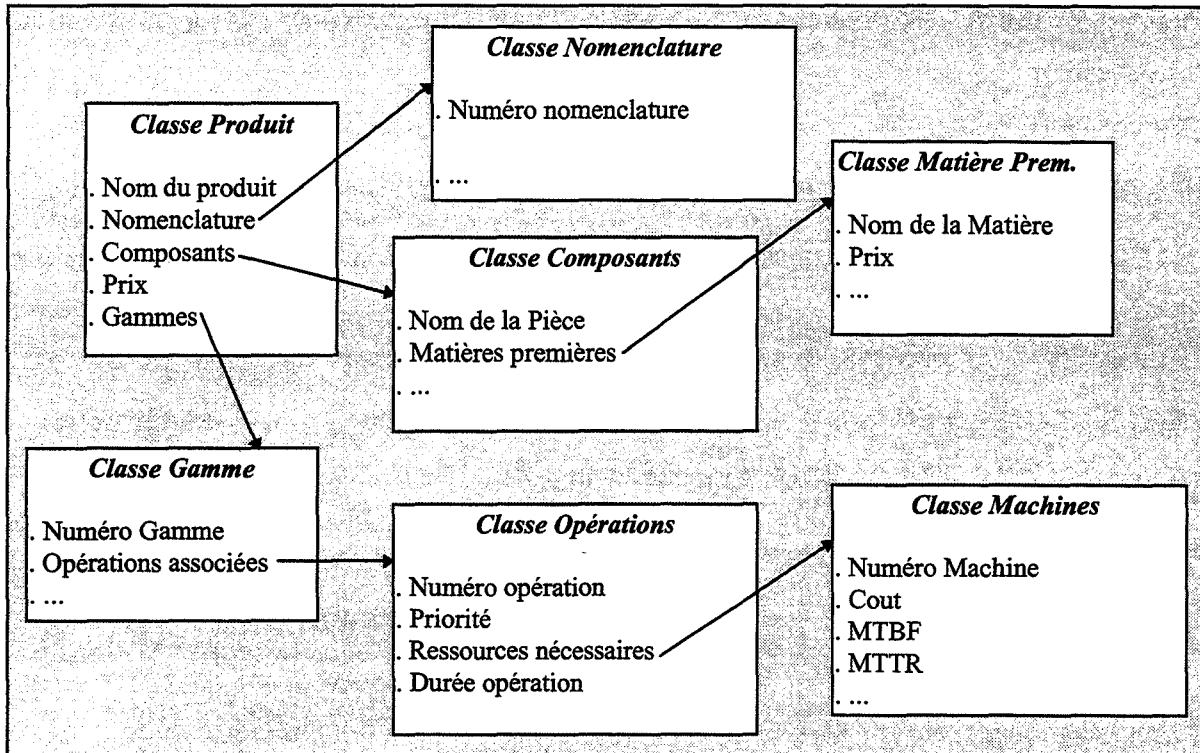


Figure V.4 « Liens de Composition entre Classes d'Objets pour la Production »

Une fois les classes d'objets déterminées, il faut les décrire de manière structurale. Pour cela, Ye [Ye, 94] propose six sortes d'attributs qui spécifient et fournissent les données essentielles des objets. Ce sont les attributs : structurels, conjoncturels, instantanés, événementiels, historiques et statistiques.

- Les attributs *structurels* caractérisent les aspects technologiques et relativement invariants du produit. Pour la simulation des flux de production, les principaux attributs structuraux comprennent : identificateur, matière première, gamme de fabrication, etc.
- Les attributs *conjoncturels* expriment les besoins de l'instance d'une entité dans le système tels que : ordre de fabrication, en-cours, priorité, date de commande, etc.
- Les attributs *instantanés* expriment l'état d'avancement des entités du système. Ils comprennent : opération en cours, position dans la gamme, taille des stocks, etc.
- Les attributs *événementiels* expriment l'évolution des attributs instantanés. Ces valeurs vont permettre de déterminer avec précision comment les entités ont été occupées : début et fin d'une opération, début et fin d'attente, début et fin de contrôle de qualité, etc.
- Les attributs *historiques* définissent, par exemple, dans quelles conditions (un ensemble de

résultats) un produit a été élaboré, et ceci afin de dégager des lois caractéristiques du système de production.

- Les attributs *statistiques* utilisent les attributs historiques pour définir des lois représentatives du flux à travers le système de production. Ces données peuvent, entre autres, servir de référence pour valider des résultats de simulation.

La figure (fig V.5), décrit un exemple d'attributs et de services que doit avoir une ressource principale de type « Machine ». Cette liste n'est évidemment pas exhaustive, elle peut être réduite ou complétée en fonction du système à simuler.

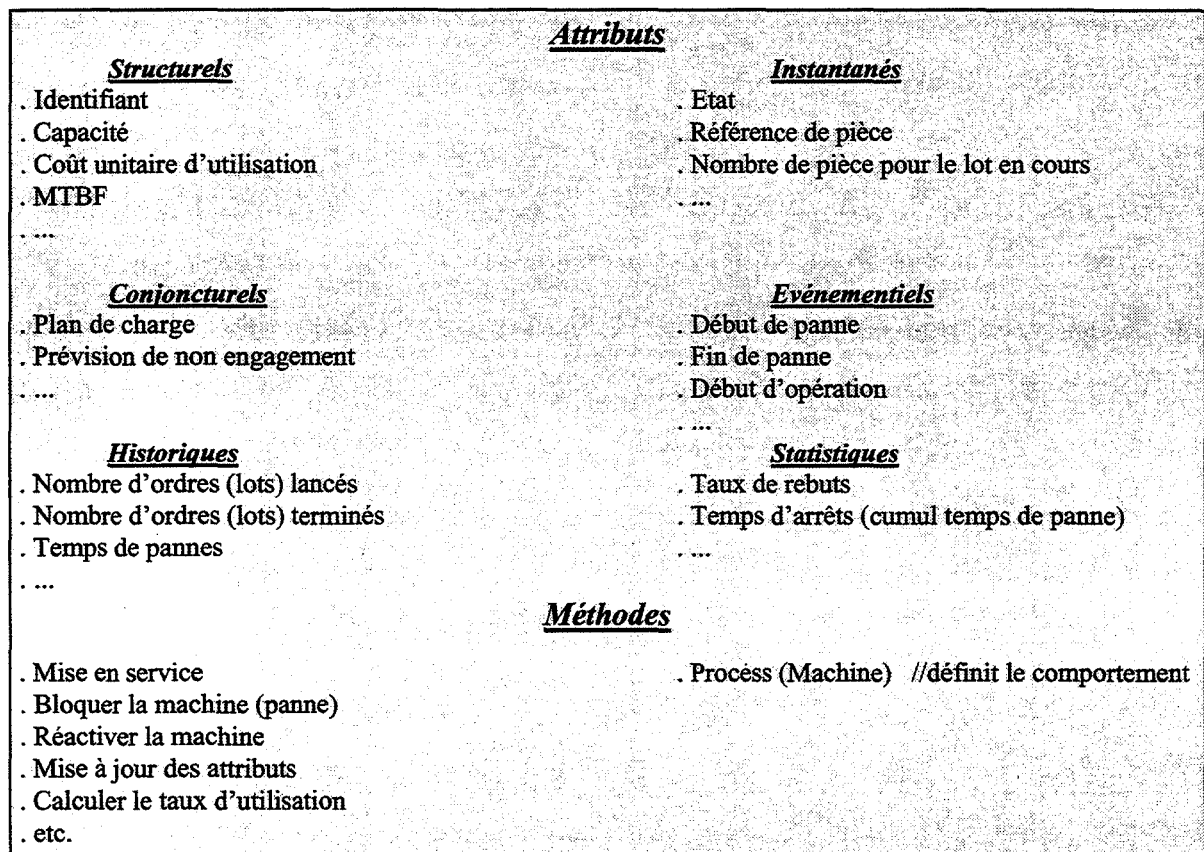


Figure V.5 « Exemple d'Attributs et Méthodes d'une Classe Machine »

La machine étant représentée par un objet actif, il faut décrire le script (contenu de la méthode particulière PROCESS) qui va définir son comportement (fig. V.6). Comme nous l'avons décrit dans le paragraphe concernant les moyens de production, ce comportement est élémentaire et il ne servira qu'à activer les différentes méthodes de la « Machine » (bloquer, réactiver,...) en fonction de la valeur des attributs associés (MTBF, MTTR).

```

. Process (Machine)
{ Etat = « Disponible »;    // Mise en service de la machine
  ...
  Wait (MTBF);              // Attente de la prochaine panne (durée prédéfinie)
  Etat = « Bloqué »;        // Machine bloquée pour une durée égale à MTTR
  Wait(MTTR);               // Attente fin de la panne.
  Etat = « Disponible »;    // La machine est à nouveau disponible
  ...
}

```

Figure V.6 « Comportement de la Classe Machine »

Le détail de ces différentes classes, et une étude approfondie des caractéristiques nécessaires à la modélisation et à la simulation objets de systèmes de production est disponible dans les travaux de Kellert [Kellert, 92], Hill [Hill, 93], et Ye [YE 94]. Nous allons détailler particulièrement les « Centres d'Activités » et les « Agents Cognitifs ».

3.3 Les « Centres d'Activités »

Ces classes d'objets particulières définissent des processus opérationnels dans l'entreprise (aussi bien physiques, qu'administratifs). Elles sont implantées sous forme d'objets actifs (processus concurrents) car elles représentent des processus qui vont consommer du temps et se synchroniser les uns avec les autres. Nous étudierons les comportements de ces centres d'activités et les différents liens qui les unissent aux « Agents Cognitifs » et entre eux.

Dans un premier temps, nous allons en définir un certain nombre et les décrire de manière statique. Les centres d'activités peuvent être de deux sortes :

↳ *Physiques* : ce sont les centres qui sont liés directement au processus physique de l'entreprise, c'est-à-dire qu'ils sont responsables du traitement des flux physiques et de la gestion des moyens de production qui leur sont rattachés. Nous pouvons citer les : CA transformation, CA maintenance, CA assemblage, CA transport, etc.

↳ *Administratifs* : qui correspondent à des traitements spécifiques de l'information circulant dans l'entreprise, tels que les : CA investissements, CA calcul des besoins, CA ordonnancement planifié, CA allocation des ressources (planifié), CA comptabilité, CA statistiques, etc.

3.3.1 L'analyse Statique

Les attributs principaux qui caractérisent les centres d'activités se résument à :

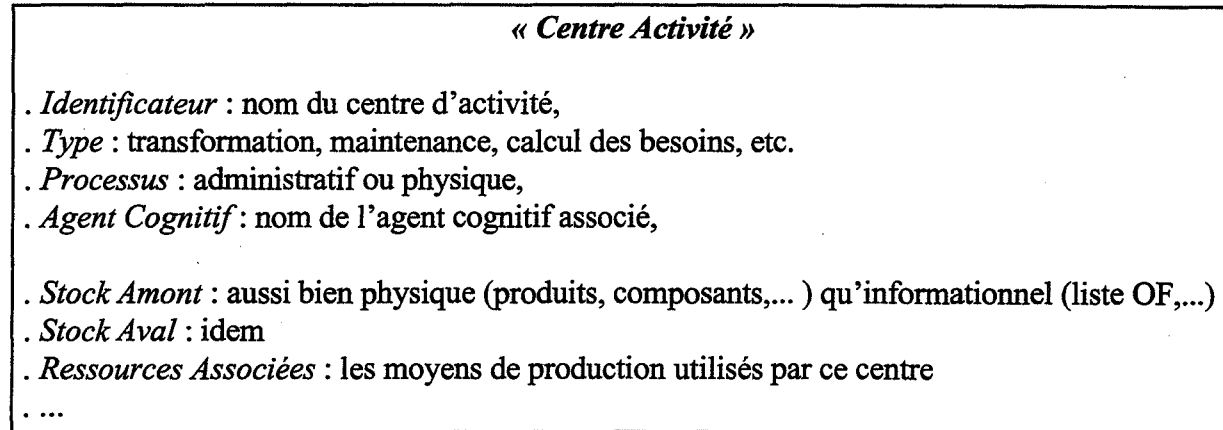


Figure V.7 « Attributs d'un Centre d'Activité »

A partir de cette classe générique, les différents centres d'activités seront spécialisés et enrichis en fonction du processus particulier auquel ils appartiennent (fig. V.8).

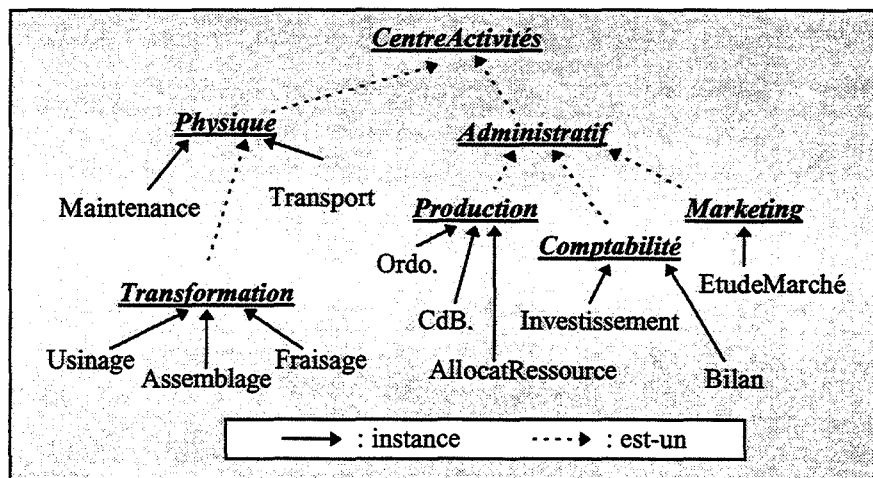


Figure V.8 « Généralisation Spécialisation des Centres d'Activités »

De la même manière nous pouvons décrire les liens de composition forts qui permettent à un centre d'activité d'être un objet complexe dont les champs sont des instances d'autres classes d'objets :

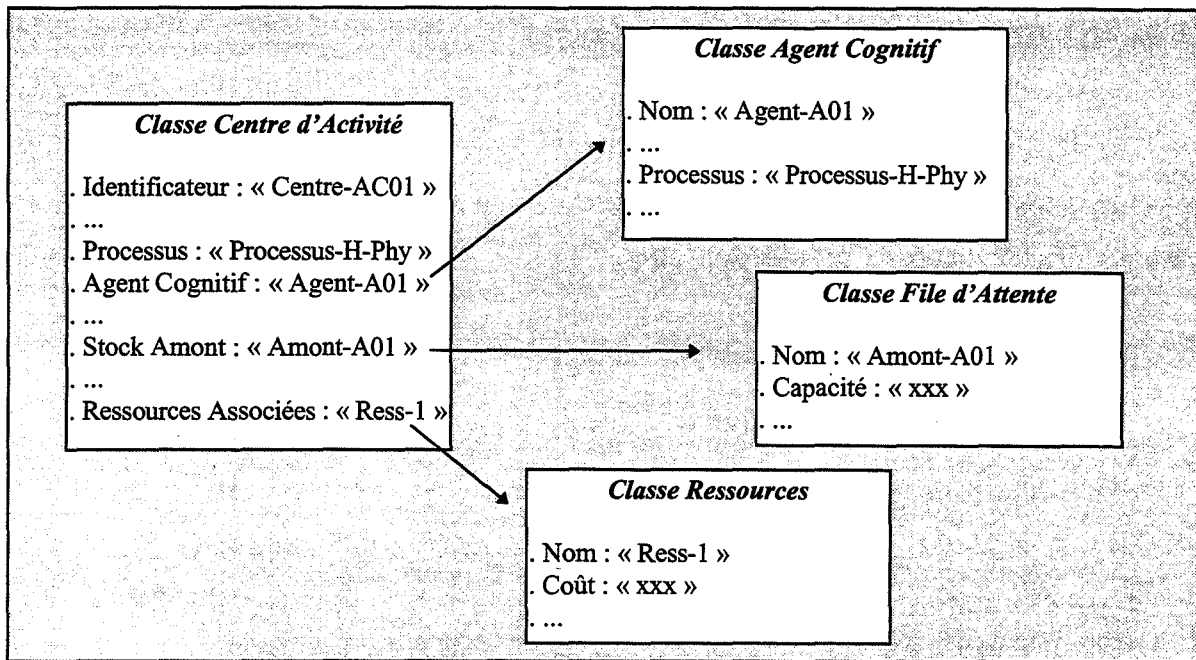


Figure V.9 « Liens de Composition d'une Classe Centre d'Activité »

3.3.2 Le Modèle Dynamique

Dans cette partie qui consiste à spécifier les objets actifs (dont le cycle de vie est important), nous allons détailler les aspects comportementaux des « centres d'activités », c'est-à-dire décrire des scénarios, des diagrammes de communication, des diagrammes de transition d'états et de flux d'événements, pour les différentes classes d'objets correspondantes.

A la différence du modèle statique, qui représente les objets et leurs relations à un instant donné, le modèle dynamique décrit l'évolution des objets du système au cours du temps. Pour présenter ce modèle, nous allons nous baser sur le formalisme proposé par la méthode OMT qui utilise à ce niveau deux concepts fondamentaux :

- *l'événement*, qui représente un stimulus, interne ou externe au système, reçu par un objet. Pour chaque objet actif, on doit recenser les événements qui peuvent l'affecter et définir ainsi un scénario.
- *l'état*, qui caractérise la réponse d'un objet à un événement d'entrée. Le diagramme d'état représente l'ensemble des états d'un objet et les différents événements qui permettent de passer d'un état à un autre (c'est un complément du scénario).

3.3.2.1 Scénarios pour les « Centres d'Activités »

Les scénarios décrivent des séquences d'événements qui entraînent des changements d'état et de comportement des objets actifs. Nous allons proposer, à titre d'exemples, quelques scénarios concernant les « Centres d'Activités ».

- *Scénario 1 « Transformation de produit »* : ce scénario est lié à un ensemble d'événements (arrivée d'une décision, arrivée d'une pièce, présence des ressources nécessaires), et il consiste à transformer des pièces prises dans un stock amont, sur décision d'un « agent cognitif », et de les envoyer dans un stock en aval du poste. Cette phase de transformation consomme du temps (durée opératoire, durée de changement d'outils, etc.)

- *Scénario 2 « Transport »* : les événements associés à ce scénario sont : arrivée d'une décision, arrivée d'une pièce, etc. Il consiste à transporter des produits d'un poste à l'autre, sur demande d'un « agent cognitif ».

- *Scénario 3 « Maintenance »* : c'est un processus particulier, piloté par un agent chargé de gérer la maintenance et les pannes des ressources. Il va agir directement sur les ressources principales et les rendre disponibles après un temps de réparation égal à la valeur du MTTR (propre à la ressource) auquel est ajouté une durée d'attente de disponibilité des ressources nécessaires à la réparation.

- *Scénario 4 : « Allocation des Ressources »* : c'est un processus particulier qui va, selon des priorités, attribuer les ressources disponibles aux différents centres d'activités. Pour cela, il a besoin d'avoir une décision d'un agent cognitif à un temps t , et de connaître les différents besoins des centres d'activités à cette date.

- *Scénario 5 : « Calcul des Besoins »* : processus qui permet d'établir les besoins par type de produit et par période. Il est activé par une décision d'un agent, et consiste à transformer les différentes commandes provenant des clients en un carnet de commandes ordonnées, exploitable par les responsables de l'ordonnancement.

- *Scénario 6 : « Ordonnancement Planifié »* : consiste à établir des listes d'ordre de fabrication (OF) à transmettre aux agents du processus physique. Ces OF sont établis en fonction du carnet de commande (résultat du calcul des besoins), et à partir d'une décision d'un agent.

3.3.2.2 Les Diagrammes d'Etats

Une fois les différents scénarios définis, nous allons représenter sur des diagrammes d'états les différentes transactions entre les classes d'objets intervenant dans le processus.

Scénario 1 « Transformation de produit » : le modèle de communication (fig. V.10) de ce centre d'activité décrit les interactions du processus avec son environnement (différentes classes d'objets) et les états associés à ces communications.

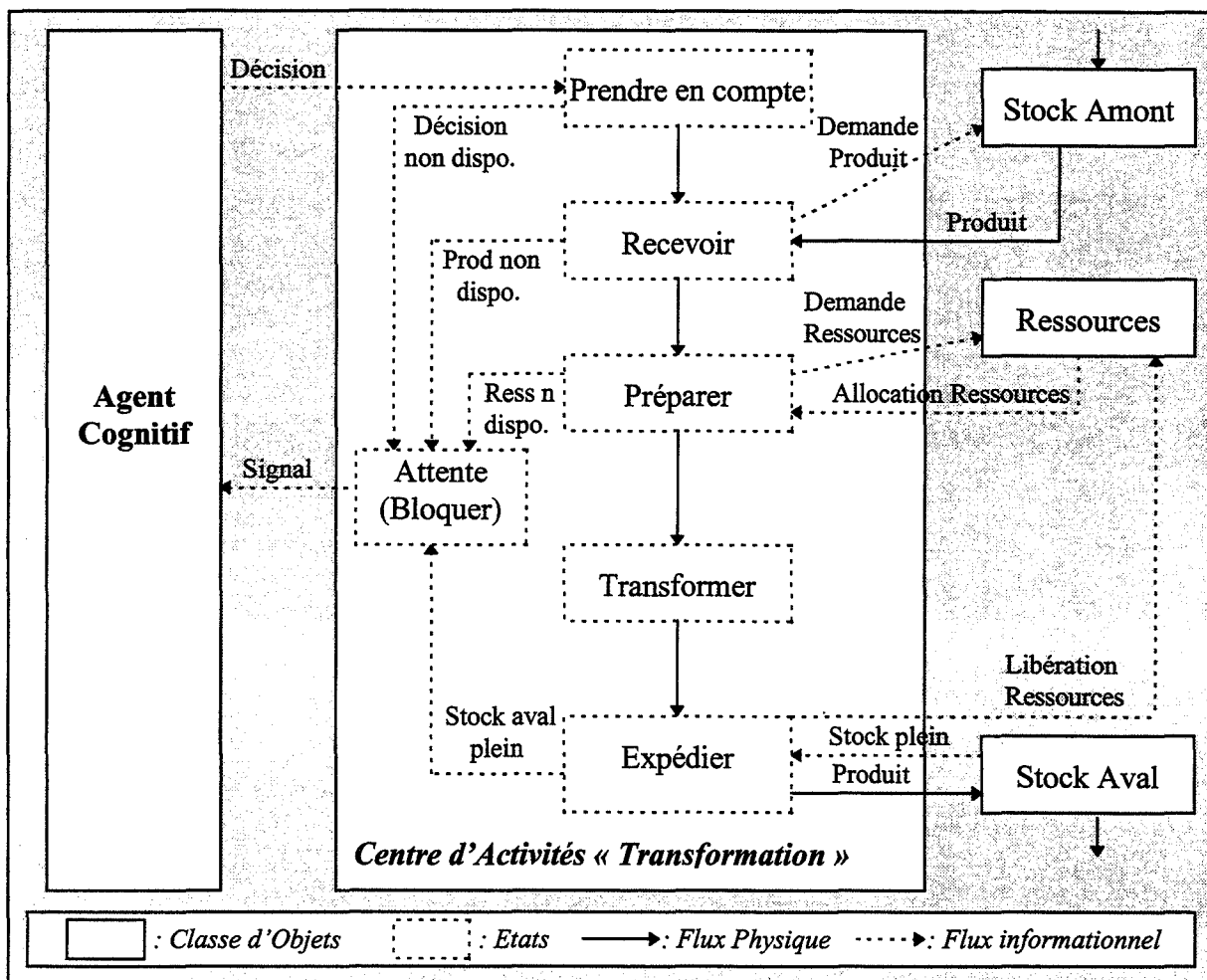


Figure V.10 « Modèle d'Etat d'un Centre d'Activité »

Le centre d'activité va recevoir une décision, contenant un ensemble de paramètres (type de produit, quantité, ressource à utiliser, taille de lot, etc.), de l'agent cognitif auquel il est rattaché. Il va scruter le stock amont en quête de produits et vérifier que les ressources

nécessaires sont disponibles. A cours de ces trois opérations le centre d'activité peut se retrouver en position d'attente : de décision, de produits ou de ressources, dans ce cas l'agent cognitif (à partir de son module de perception) doit éventuellement étudier l'état du système (stocks, ressource, etc.) et prendre une décision temps réel pour débloquer, si possible, le centre d'activité. Une fois l'activité de transformation des produits achevée, le centre doit les expédier dans un stock aval. S'il est plein, le processus est de nouveau bloqué. Une fois l'expédition effectuée, le centre d'activité se remet en position d'attente d'une décision.

Ce diagramme est relativement générique pour l'ensemble des centres d'activités, en effet pour les centres d'activités administratif, par exemple, il y aura *prise en compte* de la décision de l'agent puis une phase de *préparation* (nécessité de ressources informationnelles par exemple) suivi d'un *traitement* particulier (algorithme de calcul des besoins, formule de calcul du nombre d'étiquettes kanban, établissement des factures, ...) qui entraînera *l'expédition* des résultats soit dans le système d'information (base de données, variables globales, ...) soit directement aux agents qui les pilotent.

3.3.2.3 Un Diagramme Temporel pour le centre d'activité « Transformation »

A partir du diagramme de communication nous pouvons décrire sur un diagramme temporel (fig. V.11) l'évolution dans le temps du centre d'activité. Pour cela, il faut définir des intervalles de temps entre les différents changements d'états du centre d'activité.

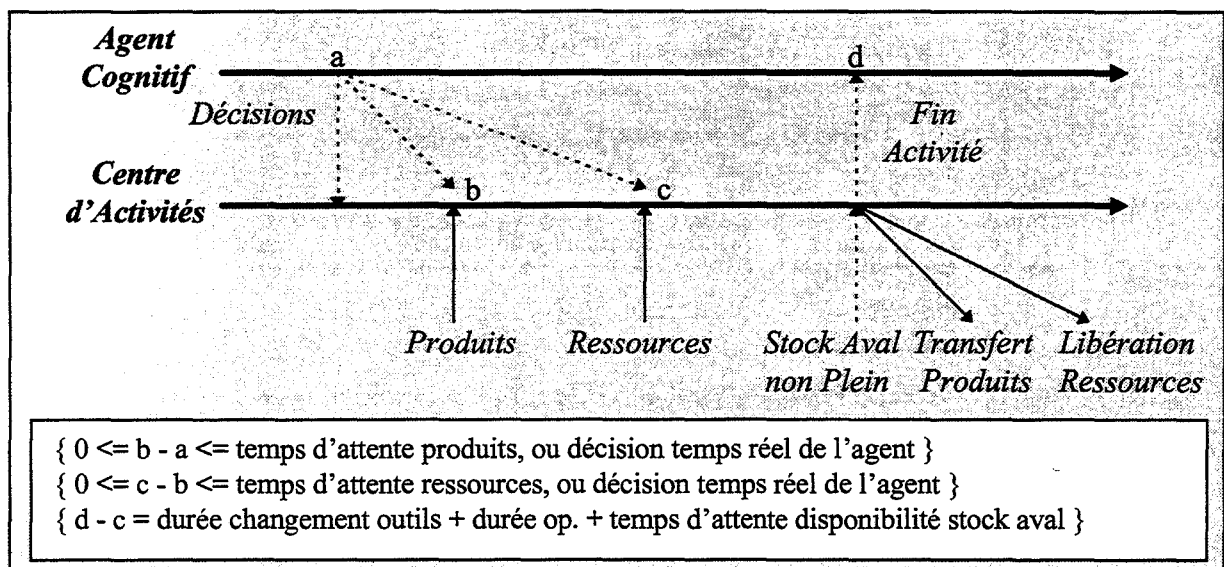


Figure V.11 « Diagramme Temporel d'un Centre d'Activités »

4 LA SOCIETE d'AGENTS COGNITIFS

La structure des agents cognitifs a été présentée dans le chapitre précédent. Nous allons voir concrètement la manière dont ils sont implémentés à l'aide d'objets actifs.

4.1 Le Modèle Statique

L'environnement de développement étant un environnement objet, la structure des agents est déterminée par un ensemble de champs, qui ont pour valeur des objets qui représentent les composants de l'agent (les bases de connaissances, la boîte aux lettres, etc.) ou qui déterminent une configuration de l'agent (l'état, les données, etc.). Ces champs peuvent être regroupés en fonction de leur contribution à l'implémentation des différents modules (perception, communication, raisonnement, etc.) des agents.

Nous avons choisi une représentation « tout objet » dont le fondement réside dans l'encapsulation au sein d'une même entité (une classe) des caractéristiques décrivant un concept. Cette représentation permet une structuration des données sous forme de réseaux d'objets, tout en facilitant l'établissement de relations entre les données. De plus, elle nous offre une représentation fonctionnelle et structurelle explicite, nécessaire pour les données de simulation.

Nous allons décrire l'ensemble des objets issus du modèle de représentation (agent, boîte aux lettres, événements, messages, décisions, etc.) puis nous définirons un ensemble d'objets utilitaires (file d'attente, base de connaissances, faits, règles, ...) qui vont servir à la mise en place de la structure et des fonctionnalités des agents.

Avant de décrire plus en détail cette structure d'agent cognitif, nous allons présenter l'architecture organisationnelle de la société.

4.1.1 Les Classes « Organisation »

Pour modéliser les structures organisationnelles nous avons établi un ensemble de classes d'objets passifs de type informationnel qui représentent les niveaux d'organisation spécifiés

dans le modèle de compréhension. Ces classes (projet d'entreprise, processus opérationnels, et chaîne d'activités) vont nous permettre de situer la position de chaque agent dans l'organisation et de spécifier ses accointances et les différents liens associés.

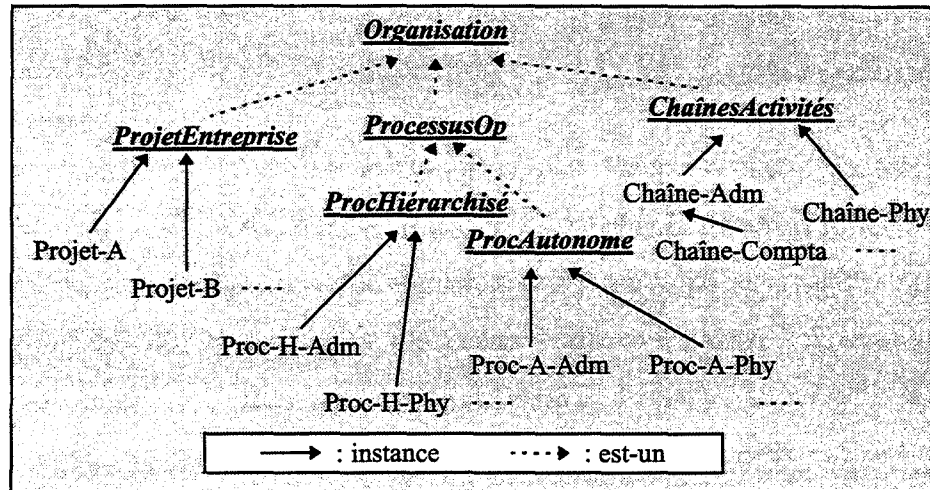


Figure V.12 « Structure des Classes d'Organisation »

De plus, les rôles et les compétences de chaque agent étant fixés à l'initialisation du système, il est important de connaître leur situation dans l'organisation, et dans le cas de structure de type « Effet de groupe » de connaître le méta-agent associé au collectif d'agents.

Pour cela, nous faisons la distinction entre processus opérationnels « Hiérarchiques » et « Autonomes », car comme nous l'avons précisé dans le chapitre II le modèle de compréhension (emboîtement en niveaux de responsabilité) conduit à deux types d'organisation possibles :

- une organisation hiérarchique classique, représentée par la classe « ProcHiérarchisé » dans laquelle seront spécifiés les différents responsables (fig. V.13) ;
- une organisation de type effet de groupe (collectif), modélisée par la classe « ProcAutonome » dans laquelle les différents participants et le Méta-Agent (agent cognitif résultant des interactions du groupe) seront définis.

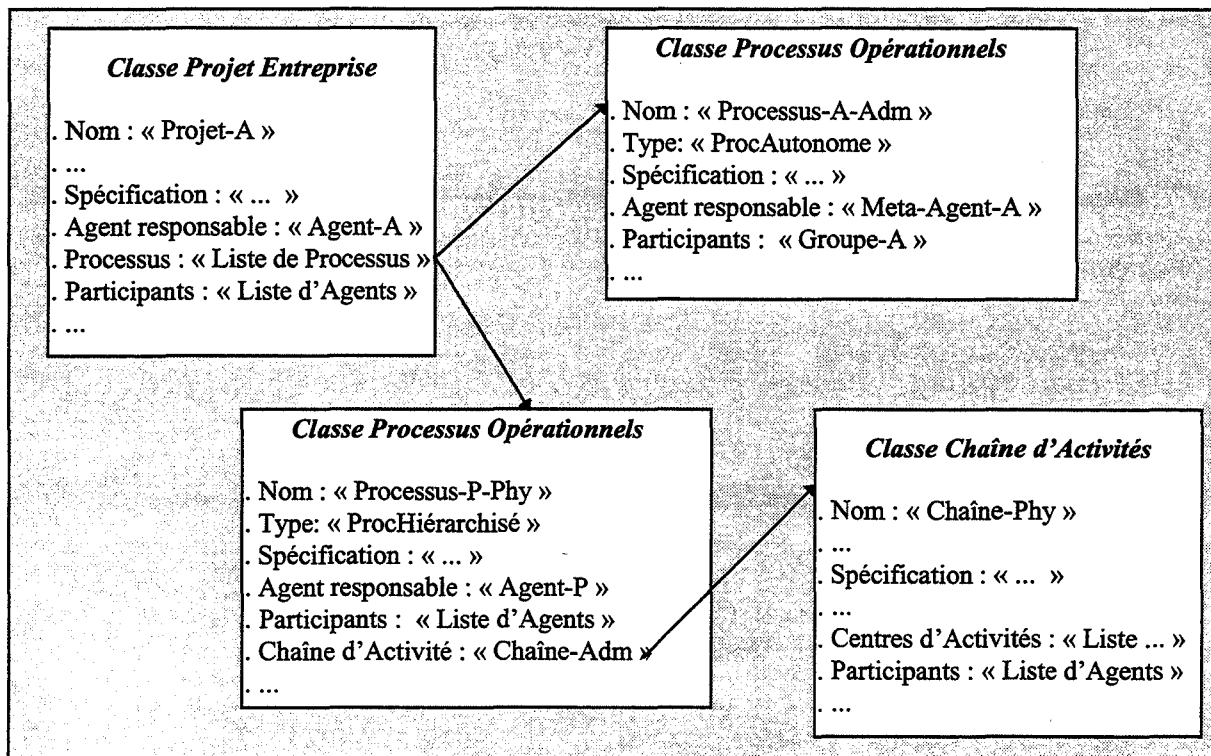


Figure V.13 « Exemple de Classes d'Organisation »

4.1.2 La Classe Générique « Agent Cognitif »

A partir des principes objets, nous allons définir une classe unique « Agent Cognitif » qui permettra de décrire la population d'agents par simples mécanismes de spécialisation et d'instanciation.

Les agents possèdent une liste d'attributs (fig. V.14) : nom, processus, accointances, état, boîtes aux lettres, connaissances, etc. et un ensemble de fonctions de : communication (interpréter, création, envoi,...), perception (récupérer, bruiteur, signaler, ...), contrôle (sélectionner, activer, inhiber,...), raisonnement (raisonner, inférer, ...) etc. qui correspondent à l'ensemble des spécificités et fonctionnalités définies dans le modèle de représentation agents (cf. IV.4).

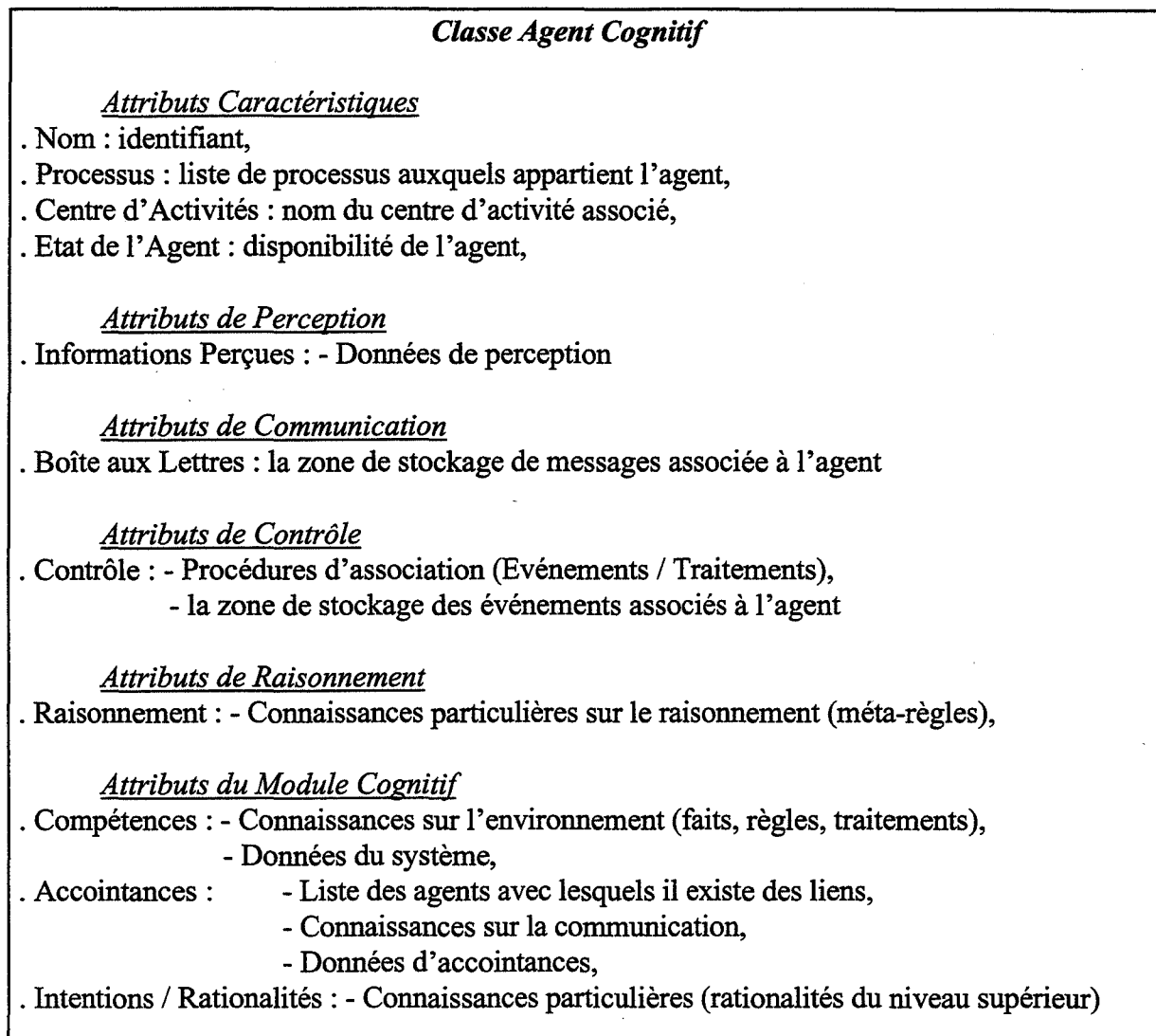


Figure V.14 « Structure de la Classe Générique Agent Cognitif »

La figure V.14 présente la structure minimale d'un agent cognitif, c'est-à-dire les attributs caractéristiques de chaque instance de la classe « Agent Cognitif » (nom, état, processus, etc.), les champs (compétences, accointances, intentions et rationalités) qui constituent le **module cognitif** et qui servent à recevoir les différents types de connaissances qui définissent les accointances et l'expertise de l'agent. Et enfin, les connaissances et données (contrôle, raisonnement) qui représentent la matière sur laquelle les **modules de contrôle** et de **raisonnement** vont fonctionner.

Exemple d'instance de la classe « Agent Cognitif » (fig. V.15) :

| |
|---|
| <p>. Nom : « Agent-A01 »</p> <p>. Processus : « Processus-Adm »</p> <p>. CentreActivite : « Centre-AC01 »</p> <p>. Etat : « Occupé »</p> <p>. Perception : « Etat-CA = libre; Production totale en produit A = 514;... »</p> <p>. Boite aux Lettres : « File-Mess-1 »</p> <p>. Contrôle : « File-Event-1 »</p> <p>. Raisonnement : « BC-R-A01 »</p> <p>. Compétence : « BC-K-A01 » « Durée d'ouverture = 8 h, Etat du stock amont = 20 pièces, ... »</p> <p>. Accointance : « BC-A-A01 » « Nombre d'accointances = 4, Nbr d'accointance dans le processus = 2, ... »</p> <p>. Intention / Rationalités : « BC-I-A01 »</p> |
|---|

Figure V.15 « Exemple d'Instance de la Classe Agent Cognitif »

- Les attributs « BC-x-A01 » représentent des liens avec des instances de la classe « Base de Connaissance » qui peut être elle même composée de faits, de règles, de procédures de traitements, etc.
- L'attribut « File-Event-1 » correspond à la zone de stockage des événements provenant des différents modules. Ces événements vont être gérés par l'unité de contrôle pour synchroniser les différents traitements.
- Les données sont définies par rapport à chaque agent dans les champs correspondants aux différents modules (perception, communication, etc.).

4.1.3 Représentation de la Connaissance de l'Agent

Nous avons vu que la structure du savoir-faire d'un agent est telle que ses connaissances sont réparties dans trois structures : « Module Cognitif », « Raisonnement », et « Contrôle ». Chaque agent possède un ensemble de données, de faits, de règles de production et de procédures de traitement (algorithmes, fonctions, ...) qui structure ses connaissances.

↳ *Les données* : sont des attributs valués des champs des différents modules.

↳ *Les Faits* : peuvent être des instances d'une classe « Faits », ou des attributs de l'agent. Ces instances sont mises à jour par le système inférant du module de raisonnement de l'agent qui, en fonction de l'état du système, va les rendre vraies ou fausses. Par exemple, au niveau d'un processus administratif qui traite des commandes, le fait « Commande Urgente » sera vérifié ou non ; ce qui entraînera des stratégies (applications de règles et traitements) particulières.

↳ *Les règles* de production possèdent une structure de type :

SI [Condition] *ALORS* [Action]

- Les [Conditions] sont des tests de vérification de faits dans les structures de données.
- Les [Actions] permettent de construire des raisonnements en s'appuyant sur des données initiales, des résultats partiels, ou des connaissances fournies par les autres agents.

Par exemple : « *Si* (Commande Urgente) & (Matières Premières Disponibles) & ...

Alors (Lancer Production) »

Ces actions font le lien avec des procédures de traitements.

↳ *Des procédures de traitement* : permettent d'enrichir les capacités de raisonnement de l'agent par le biais d'algorithmes ou de procédures particulières de calcul. Elles seront implantées dans une classe d'objet particulière dont les méthodes correspondent aux traitements associés.

Les connaissances sont structurées de la manière suivante dans les trois modules :

❶ *Le module cognitif* : constitué de bases de connaissances, et de données représentant l'état du système et des accointances :

↳ des données d'accointances : liste des accointances, état des accointances, nombre, type de lien, etc.

↳ des données de compétence : durée d'ouverture, état des stocks, taux de rebuts pour le poste, taille des lots, quantité de produit, etc.

↳ des connaissances d'accointances, qui représentent des intentions propres liées aux accointances (ne pas coopérer avec tel agent, fournir toutes les informations demandées, etc).

↳ des connaissances de *rationalités* : « évalué au rendement » « modification possible de la liste des ordres de fabrication », etc, mises à jour par l'unité de contrôle en fonction des rationalités de méta-niveaux, et des *intentions* : « respecter la rationalité évaluative de niveau supérieur », « suivre les consignes », « ne pas respecter la rationalité évaluative », etc.

↳ des connaissances de compétence : ensemble de règles et de traitements qui vont représenter le savoir-faire de l'agent : « plus le stock est important, plus la probabilité de rupture est faible », « Si stock amont vide Alors créer requête pour agent en amont », « pour satisfaire le marché il faut maximiser la production », etc.

② *Le module de raisonnement* : une base de méta-connaissance, c'est-à-dire un ensemble de méta-règles qui, en fonction de buts assignés par l'unité de contrôle, vont définir des sous-buts et déclencher des raisonnements sur les bases de connaissances (accointances, compétences, etc.) concernées. Par exemple, « Si prendre une décision, Alors utiliser base de connaissance sur les compétences. », « Si répondre à requête, Alors vérifier accointance, raisonner sur base d'accointances, et lancer procédure de réponse à requête. ».

③ *Le module de contrôle* : constitué de procédures de traitements associées aux événements à traiter. Il y a dans un premier temps une sélection de l'événement à traiter parmi une liste d'événements, puis on associe à cet événement une procédure particulière qui permettra d'activer (flots de contrôle) les modules concernés.

4.1.4 Les Messages et Décisions

Avant d'analyser les fonctionnalités internes de l'agent, et afin de mieux comprendre son fonctionnement dans un milieu coopératif, nous présentons les différents types de messages utilisés. Les messages étudiés dans le chapitre précédent (requête, réponse, information, décision, rationalité) ont tous la même structure de base représentée par la classe d'objet principale « Message » (fig. V.16).

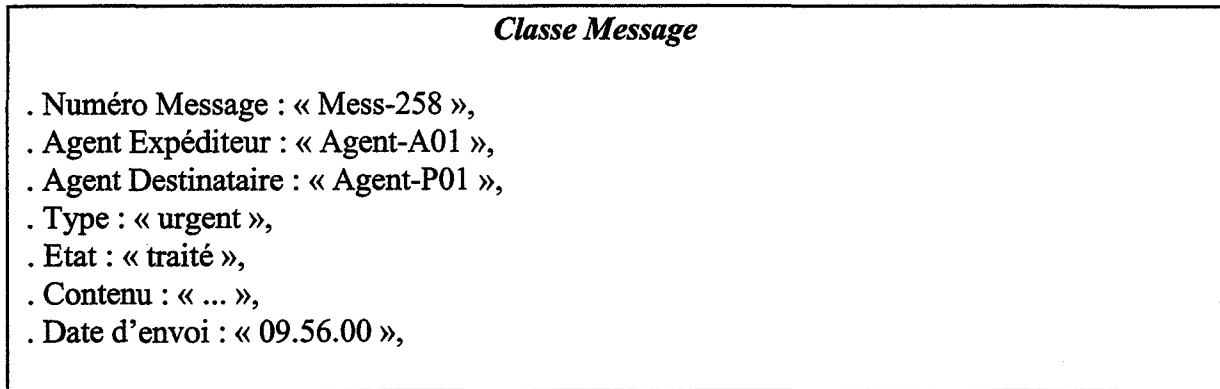


Figure V.16 « Exemple d'Instance de Classe Message »

Chaque type de message est représenté par une sous-classe (fig. V.17) : « Décision », « Message-requête », « Message-réponse », « Rationalité » et « Message-info ». Cette décomposition en sous-classes nous permet, entre autres, de créer des types particuliers de requêtes auxquels seront associées des réponses (ou tout au moins le traitement à faire pour pouvoir définir ces réponses). En effet, dans notre contexte, les interactions entre agents ne servent pas à distribuer des tâches à « résoudre », mais à prévoir pour chaque agent la possibilité de satisfaire ses besoins en informations, ou l'accès à des négociations sur les paramètres ou les règles de fonctionnement du système. Pour cela, il faut définir un cadre de communication.

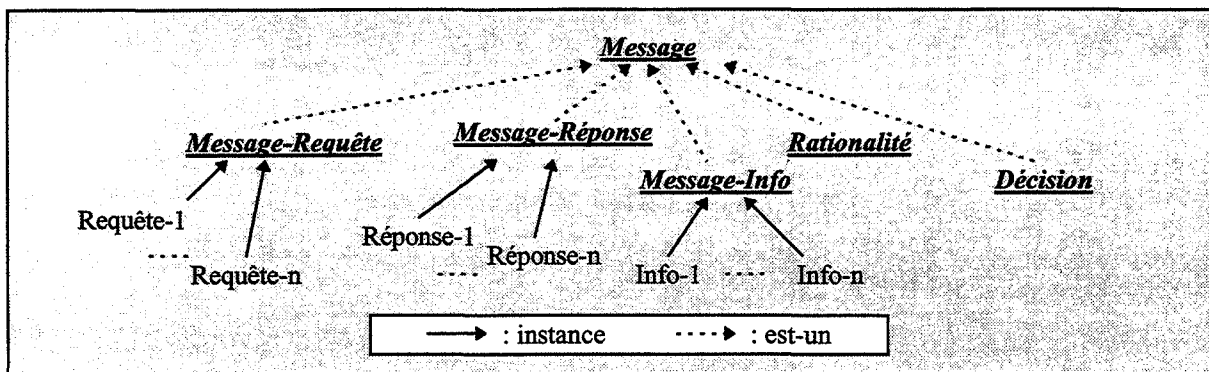


Figure V.17 « Les Classes de Messages »

• **Décisions** : selon le processus de l'entreprise dans lequel se trouve l'agent, les centres d'activités ont besoin d'un certain nombre d'informations particulières, résultats de processus de décision. Par exemple : « fréquence et quantité à produire », « type de produit », « taille de lot », etc.

- **Rationalité** : les rationalités, qu'elles soient évaluatives (Re) ou structurelles (Rs), sont transmises d'un niveau de décision à un autre par les agents cognitifs. Exemples : Rs : possibilité de modifier la structure, Re : satisfaire le marché (délai, prix, qualité), évaluer un poste au rendement.

- **Information** : les messages informationnels classiques représentent des renseignements (une formule du type $\text{Production} = \min(\text{Quantité}, \text{Stock})$, nombre d'étiquettes Kanban = ..., etc), que transmet un agent à ses accointances.

- **Requête/Réponse** : le contenu est spécifique à partir du moment où le message est interprété comme étant une requête. Un certain nombre de possibilités (problèmes associés aux requêtes) est défini lors de la création des agents et de la spécification des liens. Par exemple, entre deux agents d'un processus physique, un type de requête peut être « *Taille de lot en Produit A* », et la réponse associée sera une valeur numérique « *Taille de Lot = 20* » résultat d'une lecture des données du module cognitif. Autre exemple, à la requête « *Etat du stock en amont* », la réponse sera le résultat d'une procédure de scrutation de stock par l'agent: « *Stock-A = 100* ».

De même, on peut définir des requêtes qui vont entraîner un processus de négociation entre les agents, « *Besoin de produit B* », l'agent qui reçoit cette requête peut décider de la satisfaire totalement en ne produisant que du produit B, de la satisfaire partiellement en produisant un lot sur deux de produit B, ou de ne pas la satisfaire du tout. Ce choix se fera en fonction des connaissances d'accointances (intentions par rapport à l'agent demandeur) et de ses rationalités évaluatives (s'il est évalué en terme de production en produit A par exemple).

Dans le chapitre suivant, nous détaillerons des scénarios de négociation entre agents et des types de requêtes en fonction d'une étude comportementale d'un système industriel.

4.2 Les Mécanismes de Fonctionnement d'un Agent

Nous allons reprendre la description des agents (cf. IV.4) en nous intéressant à la manière dont les différents modules sont synchronisés, et dont ont été implémentées leurs fonctionnalités.

Pour coordonner les activités des différents modules chaque agent possède un mécanisme de contrôle local, au niveau de l'unité de contrôle, qui est activé par le mécanisme de contrôle global du système (le « scheduler »). Ce mécanisme de contrôle local va se charger d'activer les différents processus (fig. V.18) qui représentent le comportement de l'agent suivant les tâches qu'il a à effectuer.

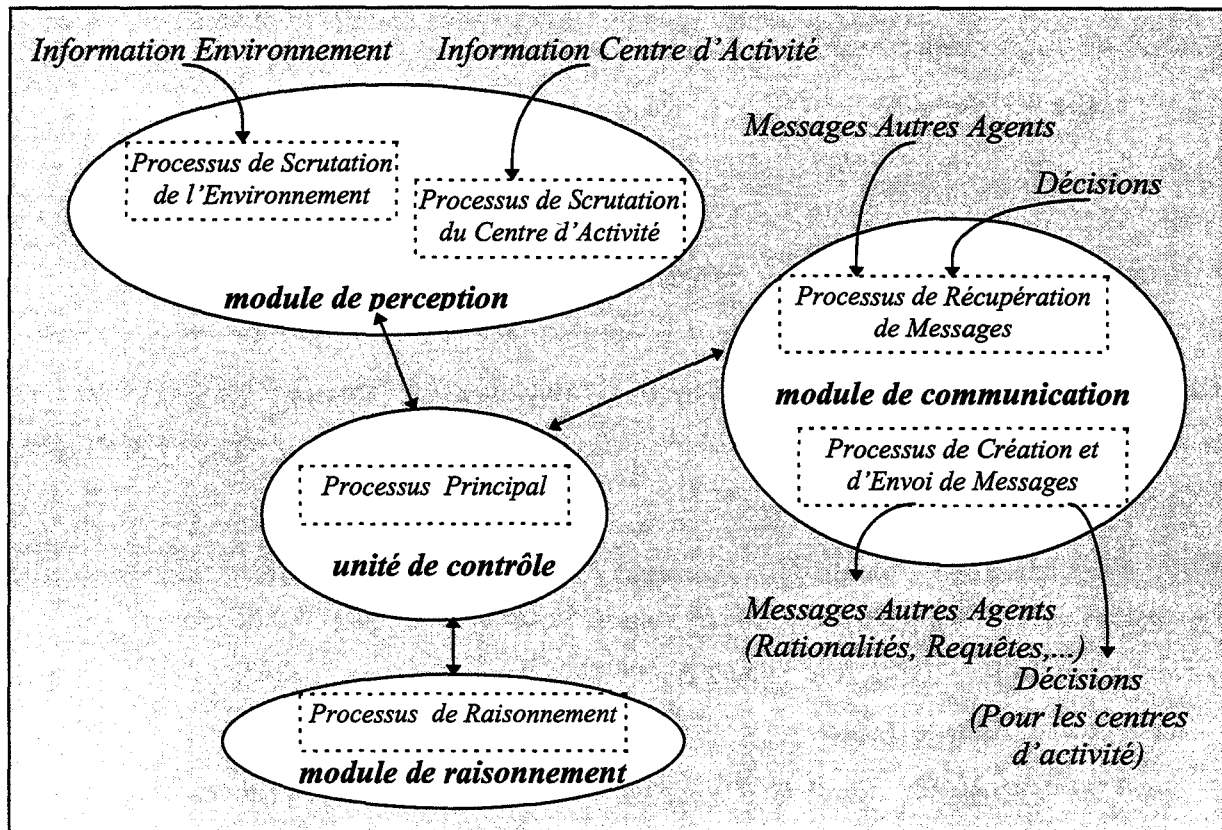


Figure V.18 « Les Processus d'un Agent Cognitif »

Les différents modules vont signaler les tâches à effectuer à l'unité de contrôle par le biais de « flots de données » représentés par une classe d'objet passif « Événement » et de sous classes spécifiques (fig. V.19)

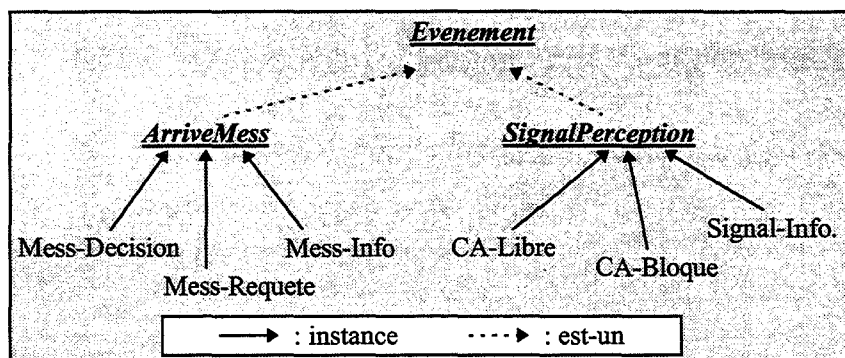


Figure V.19 « Les Classes d'Événements »

Les événements de type « ArriveMess » correspondent aux communications entre l'agent et ses accointances, alors que la classe « SignalPerception » correspond à deux types d'informations dont a besoin l'agent :

☒ des informations concernant l'état du centre d'activité qui lui est associé. Ces informations permettront à l'agent de prendre aussi bien des décisions périodiques et régulières (en fonction de la périodicité de prise de décision définie dans l'entreprise), que des décisions « temps réel », si le centre d'activité est bloqué par manque de produit par exemple, l'agent peut réagir et décider de modifier le type de production.

☒ des informations concernant globalement l'environnement : ces informations sont prédéfinies et l'agent va scruter ces données régulièrement (à chaque prise de décision par exemple) pour vérifier qu'il n'y a pas de changements importants dans le système (indicateurs de performances, seuils de sécurité,...) (fig. V.20).

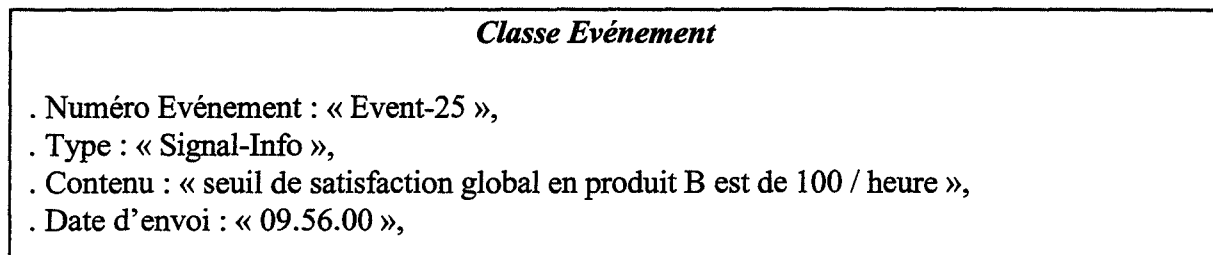


Figure V.20 « Exemple d'Instance de Classe Evénement »

Nous allons maintenant détailler, par rapport aux modules définis dans le modèle de représentation les différents processus et méthodes associés à l'agent.

4.2.1 L'unité de Contrôle

Ce module est représenté par un processus principal qui est activé par le « scheduler » du système (au début de l'exécution). L'unité de contrôle déroule son comportement (script) et active les différents modules qui lui sont associés. Pour cela, elle gère un ensemble de flots de données (événements) en provenance des modules, et elle active séquentiellement chacun d'eux en fonction des différents besoins.

Cette phase d'activation des différents modules se fait à l'aide de flots de contrôle qui sont constitués d'un signal d'activation ou d'inhibition (interruption d'un processus en cours) auquel est associé un certain nombre de paramètres. Par exemple, l'activation du module de communication se fera par l'envoi d'un signal comportant l'objectif de l'exécution de ce module (réponse à une requête, message d'information, requête, etc) et de paramètres associés (contenu des messages). Ces paramètres sont prédéfinis (instance Réponse-1, Requête-n, etc) par rapport aux compétences de l'agent, à ses besoins du moment, et au rôle qu'il a à jouer dans l'organisation.

Les différents mécanismes de synchronisation utilisés (réception et émission de signaux, sémaphores, interruptions,...) sont décrits plus en détail dans l'annexe B.

Fonctionnellement, le script de l'unité de contrôle (et de l'agent par conséquent) est constitué d'un algorithme procédural (fig. IV.9) qui définit les traitements suivants :

↳ **Sélection d'un événement** : lorsqu'un événement est transmis par l'un des modules de l'agent, il est stocké dans un « agenda », cet agenda correspond à une classe de type « File d'Attente ». L'unité de contrôle va scruter cette file, et choisir parmi les événements les plus anciens celui qui va être traité.

↳ **Association événement à traiter/traitement** : une fois l'événement sélectionné, la procédure suivante consiste à établir les actions à entreprendre, c'est-à-dire à associer à chaque événement une série de procédures de traitements (fig. V.21).

```

Si SignalPerception Alors Procédure(traiter_signal)
traiter_signal ()
{ if (« CA-Libre »)    // Si le signal provient du centre d'activité et que celui-ci est libre
  { Activate[Process(Raisonnement(decision))];    // Activer le raisonnement pour décision
    WaitForSignal(Process(Raisonnement));          // Attente signal de contrôle(fin raisonnement)
    Activate[Process(Creation-Message(decision, val1, val2))]; // Activer la communication pour
                                                                // créer une décision pour le centre
  ... }

```

Figure V.21 « Procédure : Traiter_Signal »

4.2.2 Le module de Communication

Ce module est composé d'une boîte aux lettres, et d'un ensemble de méthodes liées à la gestion des messages entre agents.

- La « Boîte aux lettres » correspond à une sous classe de la classe « DList » de la bibliothèque SIM_PP, elle a été spécialisée pour recevoir des entités de la classe d'objet passif « Messages ».

A chaque émission de message la primitive « send » effectue une opération « signal » sur le sémaphore de la boîte aux lettres du destinataire. La primitive « receive » se bloque sur le sémaphore, par une opération « wait », en attente d'un nouveau message.

- Les fonctionnalités principales de ce module sont partagées entre deux processus indépendants.

✎ *Un processus de récupération des messages*, qui est responsable de (fig. V.22) :

- l'interprétation et la classification des messages dans la boîte aux lettres : à chaque arrivée de message, le processus identifie la nature (décision, information, requête,...) et le type (urgent, normal,...) et l'insère dans la boîte aux lettres à la bonne position.
- l'envoi d'un événement à l'unité de contrôle : une fois le traitement du message effectué, il y a création et envoi d'un « Événement » à l'unité de contrôle.

```

. Process « Récupération Messages »
{
    WaitForTrigger( File-Mess-x);           // Attente du signal de contrôle
    if (Message.nature() == « Decision »)   // Test la nature du message
    { if (Message.type() == « Urgent »)      // Test le type du message
      if (Message.date() < File-Mess-x.First( « urgent » ) // Positionne le message dans la
        { add(Message->First( « urgent » )) }           // boîte aux lettres
      else
        { ... }
    }
    { ... }
    ...
    Signal-20 = new Mess-Decision(val1, val2, Val3); // Création d'un « Événement »
    Send(Signal-20).                                // Envoi signal à l'unité de contrôle.
}

```

Figure V.22 « Processus Récupération Messages »

✎ *Un processus de création et de transmission de messages* aux accointances (fig. V.23) : ce processus est activé par l'unité de contrôle par le biais d'un signal contenant l'objectif de l'activation et les paramètres qui vont constituer le contenu du message.

```

. Process « Creation et Envoi de Messages »
{
    WaitForTrigger( File-Control-x );           // Attente signale de contrôle
    if (Signal.type() == « Décision »)         // Vérification du type de message à créer
    { Dec = new Decision ( val1, val2, val3 ); // Création d'une décision avec son contenu
      Send (Dec, CA-xx);                       // Envoi de la décision au centre d'activité
    }
    else ...
}

```

Figure V.23 « Processus Création et Envoi de Messages »

4.2.3 Le module de Perception

Le rôle premier de ce module est de scruter l'environnement (ensemble d'indicateurs et de variables), et le centre d'activité associé à l'agent, de bruite les informations qu'il reçoit, de signaler à partir de règles et d'heuristiques de vérification, les modifications du système qui peuvent être pertinentes à l'unité de contrôle. Pour cela, un certain nombre de méthodes sont définies :

✎ *Mécanisme de scrutation de l'environnement* : un processus qui se charge de gérer un ensemble de variables et d'indicateurs spécifiques (définis dans une structure de données qui sera mise-à-jour par les résultats des processus des centres d'activités) nécessaires à l'agent pour sa prise de décision. Ce processus est également responsable du « bruitage » (cf. IV.4.1.5) des informations qu'il reçoit, de l'interprétation des valeurs recueillies, et de l'information de l'unité de contrôle, si nécessaire, pour une mise-à-jour du module cognitif. Il est activé périodiquement par l'unité de contrôle.

Le concept de « bruitage » de l'information perçue est défini par rapport aux systèmes réels dans lesquels l'information est souvent indisponible ou incomplète. Le but de ces travaux n'est pas de faire une étude approfondie des systèmes d'informations et de leur dysfonctionnement, mais plutôt de simuler des comportements et des prises de décisions les plus proches possibles

de la réalité industrielle. Pour cela, nous nous sommes basés sur l'hypothèse qu'il existe deux types importants de problèmes concernant l'information :

- *Les phénomènes de retard de l'information* : la responsabilité de ces retards est diverse (la source de l'information ne la transmet pas dans les délais, le récepteur ne peut pas, ou ne veut pas, tenir compte d'une information, où s'informer plus vite,...).

Dans notre société d'agents les informations circulent de deux manières : par des communications directes entre agents, ou par le biais de modules de perception. Le fait d'intégrer au module de perception des fonctions de « bruitage » permet de modéliser la volonté de l'agent de recevoir ou d'interpréter des informations plus ou moins rapidement, et de simuler les problèmes inhérents aux canaux de transmission. En ce qui concerne les retards liés à la source de l'information (autre agent) ils seront modélisés par le biais de l'envoi de messages (par exemple : une réponse à une requête qui arrive trop tard).

- *L'information est inexistante ou imprécise* : il n'y a pas obligatoirement de système d'information structuré dans toutes les entreprises, et ces systèmes quand ils existent sont rarement parfaits. Pour tenir compte de l'incomplétude et de l'imprécision de l'information il y a deux points de vue importants :

- une information est imprécise à la source : dans ce cas les informations contenues dans la structure de donnée (base de données, ensemble de variables globales, ...) seront bruitées. Nous verrons dans le chapitre suivant le type de structure que nous avons choisi en fonction de la complexité des exemples.

- le canal de communication crée des imperfections lors de la transmission de l'information : ces imperfections peuvent être simulées par le biais de fonctions, qui seront différentes, suivant le récepteur.

✚ *Mécanisme de scrutation du Centre d'Activité* : processus qui est à l'écoute du centre d'activité associé à l'agent et qui est chargé de prévenir l'unité de contrôle en cas d'anomalies dans le fonctionnement du centre (manque de ressources, de produits, stock aval saturé,...). Ces informations vont entraîner une prise de décision immédiate de la part de l'agent.

4.2.4 Le module de Raisonnement

Ce module est responsable de l'activation des règles de raisonnement sur les connaissances du module cognitif. Pour cela, il doit recevoir un objectif (but) de l'unité de contrôle, et en fonction de ce but, activer un ensemble de méta-règles concernant la tâche à effectuer. Le processus associé à ce module a les fonctionnalités suivantes :

- Choix de l'ensemble de règles à lancer en fonction d'un « but »,
- Activation du raisonnement sur cet ensemble de règles : (définition de sous buts),
- Activation du raisonnement sur le module cognitif,
- Signalement à l'unité de contrôle de la fin du raisonnement.

L'activation de ce processus sera faite par l'unité de contrôle (flots de contrôle), signal qui sera paramétré par l'addition d'un but (décision, rationalités, réponse à requête, requête,...).

4.3 Le Modèle Dynamique

De la même manière que pour les « centres d'activités », nous allons définir différents scénarios pour analyser les comportements des agents.

4.3.1 Définition de scénarios

- *Scénario 1 : « Prise de décision : système physique »* : au niveau du système physique, les agents sont chargés du pilotage des centres d'activités de type transformation, transport, assemblage, panne, etc. Pour cela ils vont, à partir de rationalités de niveaux supérieurs et d'un ensemble d'intentions et de connaissances propres, raisonner sur l'état du système et prendre une décision (quantité de produit, type de produit, nombre de composants, etc.) à transmettre aux centres d'activités. De plus, ils vont surveiller les centres d'activités, par le biais de leur module de perception, pour guetter les situations de blocage (manque de produits, de ressources, etc.) et prendre ainsi des décisions en temps réel.

- *Scénario 2 : « Communication entre Agents cognitifs »* : ce scénario est un exemple de communication entre deux agents du système physique concernant le type de produit à faire

passer en priorité sur les machines. Il est déclenché par le biais d'un événement qui est l'envoi d'un message de type « requête » d'un agent à un autre, il entraîne une interprétation de la part du destinataire du message, un raisonnement sur les tâches à accomplir et sur la marche à suivre, et des actions de type réponse à la requête, décision pour le centre d'activité, etc.

- *Scénario 3 : « Prise de décision : processus administratif »* : le système administratif est composé d'un ensemble de centre d'activités particulier de type ordonnancement planifié, calcul des besoins, etc. Les agents cognitifs de ce niveau vont devoir raisonner sur un ensemble d'informations (rationalités de niveau supérieur, intentions et rationalités de niveau propre, connaissances sur l'état du système, etc.) pour transmettre des décisions aux centres d'activités auxquels ils sont rattachés. Ces décisions seront de type (taille de lot, stocks de sécurité, nombre d'OF, quantité commandée, etc.)

4.3.2 Diagrammes d'Etat

Scénario 1 : « Prise de décision : système physique » :

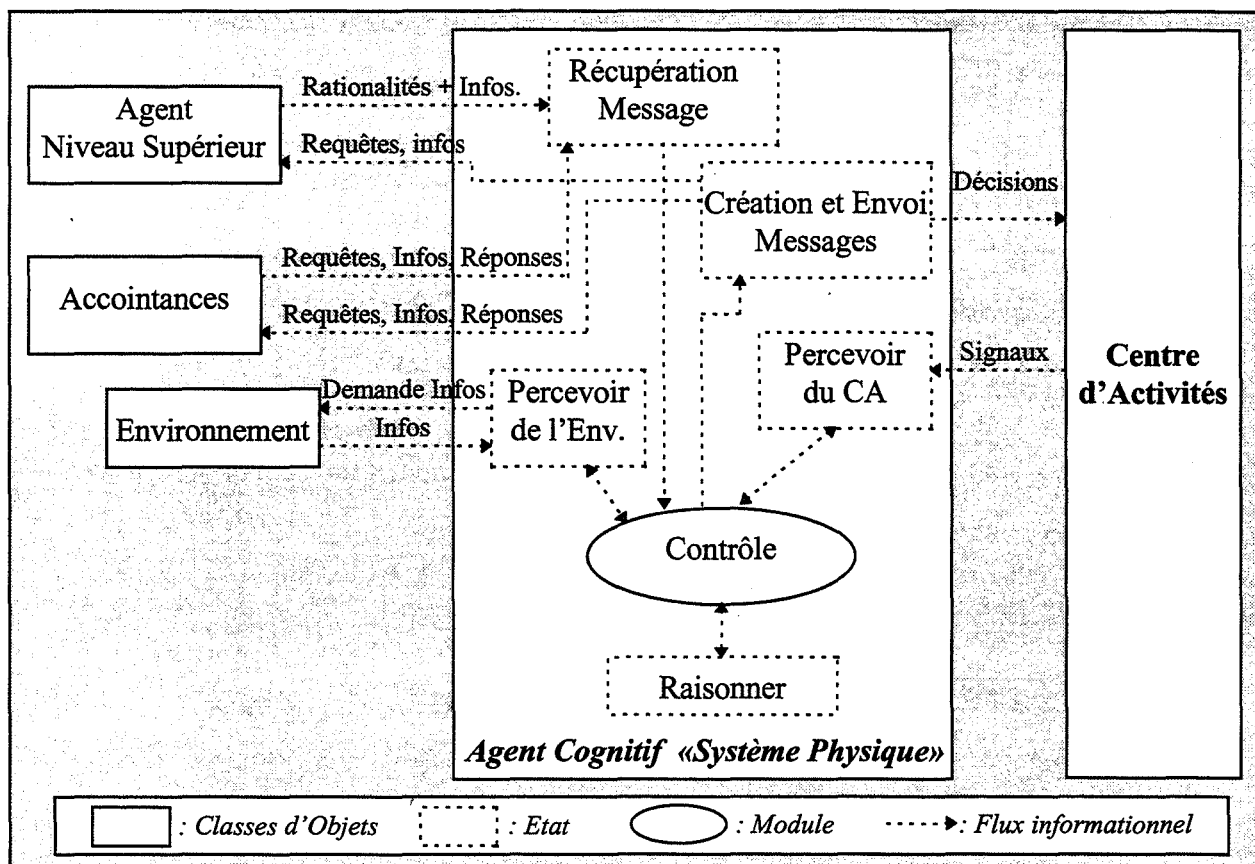


Figure V.24 « Exemple de Diagramme d'Etat d'un Agent Cognitif »

L'agent cognitif reçoit des rationalités (évaluative et structurelle) et une décision du niveau supérieur. A partir de ces informations, il va déclencher un mécanisme de raisonnement (communication avec accointances, perception d'informations sur l'état du système et sur le centre d'activités qu'il pilote) pour déterminer des décisions pour le centre d'activités. De plus, l'agent peut intervenir à tout instant sur ce centre d'activités s'il perçoit une situation de blocage (cf. Figure V.10).

4.4 Le Méta-Agent : « Effet de Groupe »

Le méta-agent qui synthétise les différentes interactions d'un collectif d'agents à la même structure que les agents définis précédemment, la seule différence est que ses connaissances (module cognitif et raisonnement) forment l'ensemble des connaissances des différents agents qui constituent le groupe en question, auxquelles sont ajoutées une représentation des intentions et des rationalités de chacun. Pour résoudre les incohérences et les conflits qui peuvent naître des interactions du groupe, il possède un ensemble de méta-règles et d'heuristiques qui favorisent le comportement global, en fonction de rationalités de niveau supérieur (projet d'entreprise), par rapport aux comportements individuels des différents agents. L'intérêt de ces heuristiques est qu'elles permettent de dépasser les intentions et rationalités propres des agents pour satisfaire les objectifs d'un collectif.

Ce méta-agent sera créé (comme tous les agents du modèle) à l'initialisation du système, les règles et heuristiques lui permettant de résoudre des conflits seront donc définies a priori par rapport à des scénarios liés à une organisation de type « effet de groupe » (un exemple sera détaillé dans le chapitre suivant). Le méta-agent sera activé dynamiquement par l'un des agents du collectif (l'agent du niveau le plus haut) dès qu'une situation de conflit sera détectée par cet agent (message signalant un refus de négociation par exemple).

Les raisonnements de ce méta-agent permettront donc de définir des « Décisions » pour les différents agents du collectif, et de modifier leurs « Rationalités », afin de mettre un terme à la situation conflictuelle. Pour cela, il utilisera les canaux de communication (messages, décisions,...) utilisés par les agents cognitifs.

Une notion intéressante à associer à ce concept d'effet de groupe est la possibilité de modifier les « Intentions » des participants du collectif. En effet, on peut supposer que les intentions des agents puissent évoluer en fonction de leur expérience et des avis divergents qui existent au sein d'un groupe.

A partir de cette réflexion nous avons déduit deux scénarios relatifs à l'horizon de l'étude :

- A court terme, il semble cohérent de dire que l'« Effet de Groupe » ne modifie que les rationalités (modes d'évaluation et degrés de liberté) des agents concernés.
- A moyen et long terme, on peut supposer voir les intentions des agents évoluer par le biais de phénomènes d'apprentissage. Ce deuxième scénario ne sera pas pris en compte directement dans nos exemples, mais la structure telle qu'elle est définie permet d'envisager ce type d'évolution.

Un exemple de structure de type « Effet de Groupe », mettant en oeuvre une résolution de conflits dans un cadre défini de processus opérationnels d'organisations productives, sera présenté dans le chapitre suivant.

5 CONCLUSION


En utilisant les concepts d'objets actifs, nous avons construit un environnement distribué capable de simuler des processus de prise de décision et de gestion pour les organisations productives. Les agents du système reproduisent, à un certain degré, les comportements des acteurs décisionnels des processus opérationnels en se rapprochant ainsi de la réalité de fonctionnement de l'entreprise.

Dans ce chapitre, nous avons présenté un système intégrant un environnement de simulation à événements discrets et une société d'agents. Ce système permet d'une part d'implémenter facilement et rapidement des organisations complexes, et d'autre part de valider et d'analyser le comportement de ces organisations par le biais de la simulation.

Ce modèle de simulation va être appliqué à différents exemples de simulation de systèmes de production dans le chapitre suivant. Ce qui permettra d'avoir une idée plus précise sur ses limites et sur les points qu'il reste à enrichir.

CHAPITRE VI

1 INTRODUCTION

 a phase finale de la démarche de modélisation - entamée dans le chapitre II par la construction du modèle de compréhension « *Méta*² », puis par sa formalisation à l'aide d'agents cognitifs, et enfin par la construction d'un modèle de simulation - consiste à mettre en oeuvre sur des exemples concrets les théories organisationnelles spécifiées à partir de la problématique industrielle décrite dans le chapitre I. Pour cela nous allons présenter deux cas d'étude permettant de valider les différents modèles et de vérifier la pertinence des concepts introduits tout au long de cette thèse :

❶ sur le premier exemple, qui est centré sur le système physique, nous tenterons de valider le comportement de notre modèle de simulation : analyse des synchronisations entre processus, adéquation du rapprochement entre structure physique et structure décisionnelle, cohérence des résultats obtenus (avec ou sans aléas), etc. en modifiant dynamiquement les modes de gestion de production.

Cet exemple s'inspire de l'ouvrage de E.M. Goldratt « Le But » [Goldratt et al. 86] dans lequel sont définis les principes de la méthode « OPT » (cf. Annexe A), il s'intitule : « Le Jeu des Allumettes », et permet d'illustrer les principales méthodes de gestion de production. Il est évident que ce modèle reste pédagogique et n'a pas une portée industrielle directe, mais à notre sens, il permet de valider une partie des concepts présentés dans la méthodologie, et surtout de faire une première évaluation des techniques de simulation employées.

❷ le deuxième exemple permettra quant à lui d'étudier le comportement des agents cognitifs (communication, raisonnement, négociation) et les performances associées aux changements organisationnels. Il présente la modélisation d'une entreprise manufacturière de type PMI de

sous-traitance. On s'inspirera, pour la configuration des différents paramètres du modèle, du cas d'une entreprise représentative des problématiques actuelles des organisations productives et du contexte industriel actuel.

2 « LE JEU DES ALLUMETTES »

2.1 Présentation du « Jeu des Allumettes »

2.1.1 Principe de l'Exemple

Le « Jeu des Allumettes » permet de représenter les flux et les phénomènes observables dans une chaîne de fabrication comportant n machines en ligne. Le traitement d'un lot sur une machine peut être assimilé au fait de consommer des pièces (allumettes) puisées dans un stock S_{i-1} , en amont de la machine, puis de les déposer dans un stock S_i en aval de cette dernière. Cette consommation est déterminée par une capacité maximale définie par le tirage aléatoire d'un dé (entier équiprobable entre 1 et 6) et par le niveau du stock S_{i-1} .

2.1.2 Hypothèses de Modélisation

A partir des principes du « Jeu des Allumettes », nous allons spécifier un modèle d'atelier de production constitué de trois machines et d'une gamme unique d'allumettes.

Le principe de base de l'évolution temporelle de ce système est celui d'un processus dont l'observation est faite à des instants régulièrement répartis dans le temps, nous avons fixé arbitrairement à 1 heure l'intervalle entre deux observations. Ainsi en terme de production, et dans le cas le plus favorable, chaque machine peut produire 6 allumettes par heure, soit 48 par jour ou 240 par semaine. Bien entendu, comme nous le verrons par la suite, la production réelle sera beaucoup plus faible à cause d'une part des aléas, intrinsèques au problème (tirage aléatoire du dé), et d'autre part du niveau des stocks déterminé par les politiques de gestion.

2.2 Le Modèle de Compréhension « Méta² »

La première étape du processus consiste à définir l'ensemble des chaînes d'activités et des processus (au sens de Lorino [Lorino, 91]) qui semblent pertinents pour illustrer les changements organisationnels envisagés.

2.2.1 Modélisation sous Forme de Processus

Les activités qui vont être représentées dans ce modèle sont essentiellement physiques, le processus de production est relativement simple, il sera constitué de trois « Centres d'Activités » (fig. VI.1) auxquels seront associés des « Centres de Décision ». Ces trois activités s'intéressent à un même flux formé par les allumettes, elles constituent donc une chaîne d'activités physiques.

Pour orienter cette chaîne d'activités, nous définirons un processus opérationnel, dont le centre de décision aura pour mission de mettre en oeuvre sur la chaîne d'activité physique les stratégies définies par le niveau supérieur. Ce niveau supérieur sera représenté par un processus stratégique qui orientera les changements organisationnels et structurels du processus opérationnel (passage du flux poussé au flux tiré par exemple).

2.2.2 Les composants du Système

Par rapport à cette vision du système, nous allons définir les quatre grandes classes d'entités qui représentent l'ensemble des composants de l'organisation :

- Les « Entités de Transactions » : ce sont les entités, aussi bien physiques qu'informationnelles, qui vont « circuler » dans le système. On retrouve principalement des produits (allumettes), des décisions (quantité à produire), et des messages (rationalités, ...).
- Les « Moyens de Production » : ensemble des ressources qui interviennent dans le fonctionnement du système : les machines et les différents stocks.
- Les « Centres d'Activités » : qui représentent les différents processus de transformation. Ils sont au nombre de trois au niveau de la chaîne d'activité physique et ils

A chaque période d'observation, la sortie du système alimente un marché (loi aléatoire de moyenne et d'écart type fixés) d'allumettes assurant une demande par période. Les évolutions organisationnelles auront donc pour objectif de définir des politiques de gestion permettant de satisfaire au mieux la demande. Pour cela, un ensemble d'indicateurs de performances sera étudié, en particulier : la production par période, l'occupation des machines, les stocks, ...

Une variante dans la configuration consistera à modifier la capacité de production (dé) de certaines machines, on supposera que les capacités sont identiques en moyenne sur toutes les machines sauf sur l'une d'entre elles. Nous analyserons les incidences de ce paramétrage sur le système suivant la position de cette machine (machine goulot).

2.1.3 Scénarios Productiques Envisagés

Nous étudierons trois scénarios productiques qui permettent de valider les changements dynamiques des modes de prise de décision du modèle, et de comparer les résultats obtenus :

↳ Le premier correspond à une organisation hiérarchique qui répond à une **logique de rendement**. Les agents cognitifs du niveau le plus bas respectent les directives de production des niveaux supérieurs, ils n'ont aucune latitude décisionnelle.

↳ Le second scénario consiste à fournir un minimum **d'autonomie** aux agents cognitifs proches du système physique. Pour cela, ils géreront leur stock d'allumettes et définiront les quantités à produire en fonction de la demande.

↳ Le dernier scénario représente une nouvelle évolution, il correspond à un mode de gestion en **flux tiré** proche du kanban. Nous allons simuler le fonctionnement d'un système de type kanban en limitant la taille (seuils de sécurité) des stocks intermédiaires en aval des postes, et en choisissant une taille de lot et un seuil de déclenchement égaux à 1 (ce qui permet d'activer la production dès que les pièces sont disponibles en stock).

A partir de cette description de l'exemple, nous allons appliquer la démarche méthodologique pour construire un modèle de simulation. Cette démarche constitue un processus d'évolution et d'enrichissement successif de différents modèles, et elle débute par la construction du modèle de compréhension *Méta*².

utilisent les *machines* pour transformer les *allumettes* qui vont passer d'un *stock* à l'autre.

- Les « Centres de Décision » : qui orientent (aux différents niveaux) la gestion et le fonctionnement des centres d'activités. Au niveau de la chaîne d'activités physique, ils vont piloter les centres d'activités en définissant les quantités d'allumettes à produire en fonction des décisions et des rationalités des niveaux supérieurs (opérationnel et stratégique). Cette production sera soumise à des aléas de fabrication modélisés par le tirage aléatoire du dé.

2.2.3 Le Modèle de Compréhension du « Jeu des Allumettes »

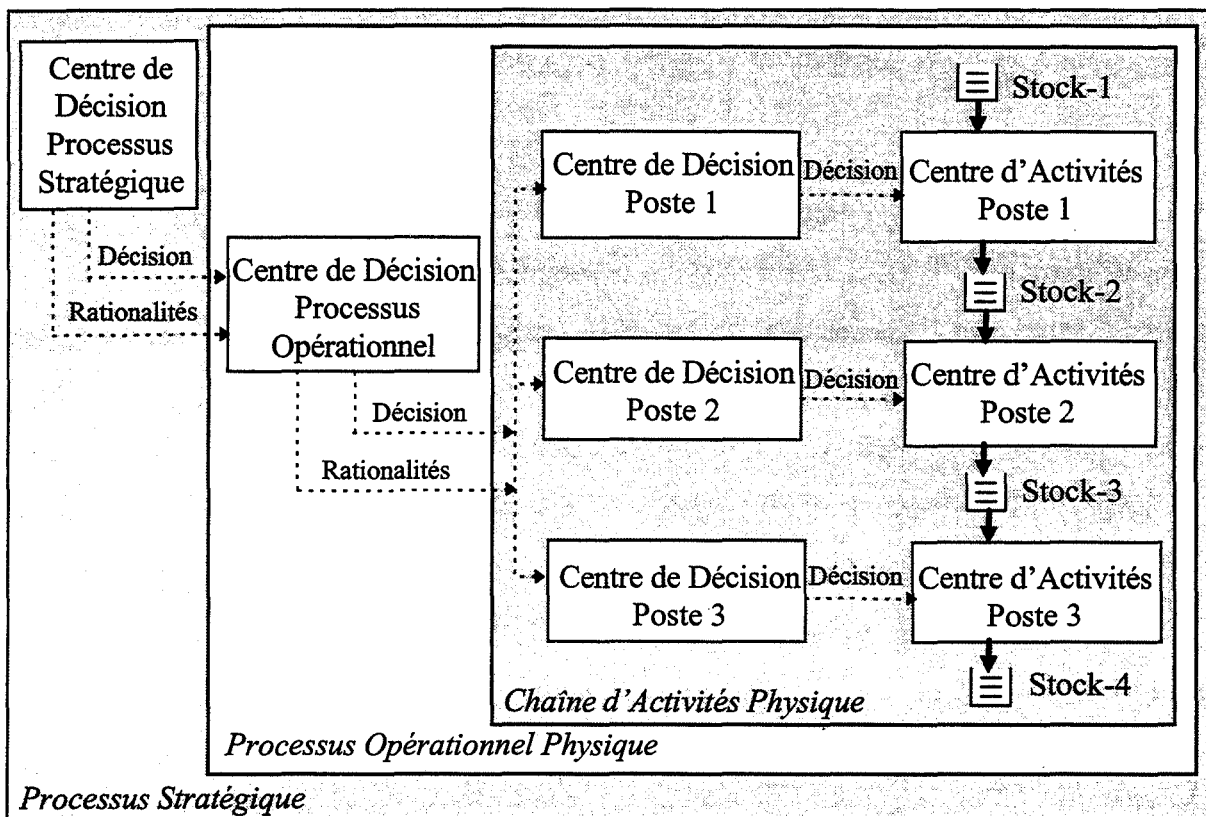


Figure VI.1 « Jeu des Allumettes : Modèle de Compréhension »

Comme nous l'avons vu dans le chapitre II (cf. Figure II.16), les centres de décision (C.D) sont constitués d'un ensemble de connaissances, d'intentions et d'informations sur l'état du système qui leur permettent de raisonner et de définir des rationalités et des décisions pour les centres d'activités ou pour les centres de décision de niveaux inférieurs. Le rôle du C.D de niveau stratégique est d'initialiser le système, c'est-à-dire qu'il ne raisonne pas pour déterminer le meilleur scénario en fonction des performances du modèle, mais il représente l'interface

entre l'utilisateur du système et les différents centres de décision. Pour cela, en fonction du scénario à mettre en oeuvre, il transmettra des rationalités évaluatives et structurelles au C.D du processus opérationnel. Nous allons décrire l'ensemble des connaissances nécessaires pour chacun des trois scénarios :

- *pour le scénario 1 : « Logique de Rendement »* : Dans ce scénario, le C.D du niveau opérationnel sera évalué au rendement (production et occupation des machines) sans aucune possibilité de modification de la structure. Les C.D du niveau chaîne d'activités ont besoin de très peu d'informations (heures d'ouverture des postes, nombre de jours de travail, ...), car leur objectif (rationalité évaluative) est de produire un maximum de pièces en fonction des stocks.
- *pour le scénario 2 : « Autonomie »* : La rationalité évaluative (Re) pour le processus opérationnel est le taux de satisfaction clients (production en fonction de la demande) et la rationalité structurelle (Rs) correspond à la possibilité de modification de la structure informationnelle (les quantités à produire). Il reçoit également une décision contenant une quantité à produire pour la période (1 semaine) qui correspond, dans cet exemple, à un calcul prévisionnel établi par le niveau supérieur. Ces directives sont déclinées au niveau chaîne d'activités par le C.D opérationnel, et les centres de ce niveau vont recevoir pour Re : le respect des quantités à produire et pour Rs : la possibilité de réajuster ces quantités en fonction de la production. La décision qui accompagne ces rationalités correspond à une quantité à produire par jour. Les informations connues par ces centres sont : l'état des stocks intermédiaires, les quantités produites par poste, les heures d'ouvertures du système, ...
- *pour le scénario 3 : « Flux Tiré »* : la rationalité évaluative pour le processus opérationnel est le taux de satisfaction clients avec réduction des stocks. Il transmet aux C.D de la chaîne d'activité les seuils de sécurité des stocks intermédiaires. Les C.D du niveau activités respectent ces seuils et en fonction de cela déterminent la quantité à produire ; pour cela ils ont besoin de connaître l'état du stock aval et les durées de prise de décision (1 heure).

Toutes ces connaissances seront décrites de manière plus complète dans le modèle de représentation à base d'agents.

2.3 Le Modèle de Représentation à Base d'Agents

Le passage du modèle de compréhension au modèle de représentation affecte essentiellement les centres de décision ; nous allons tenter d'enrichir, à ce niveau, la formalisation de ces centres en utilisant les concepts agents définis dans le chapitre IV.

2.3.1 L'Organisation des Agents

Nous ne définirons qu'une seule structure d'organisation de type hiérarchique pour cet exemple, car elle permet de modéliser les scénarios productiques proposés et le passage de l'un à l'autre sans remise en cause du modèle.

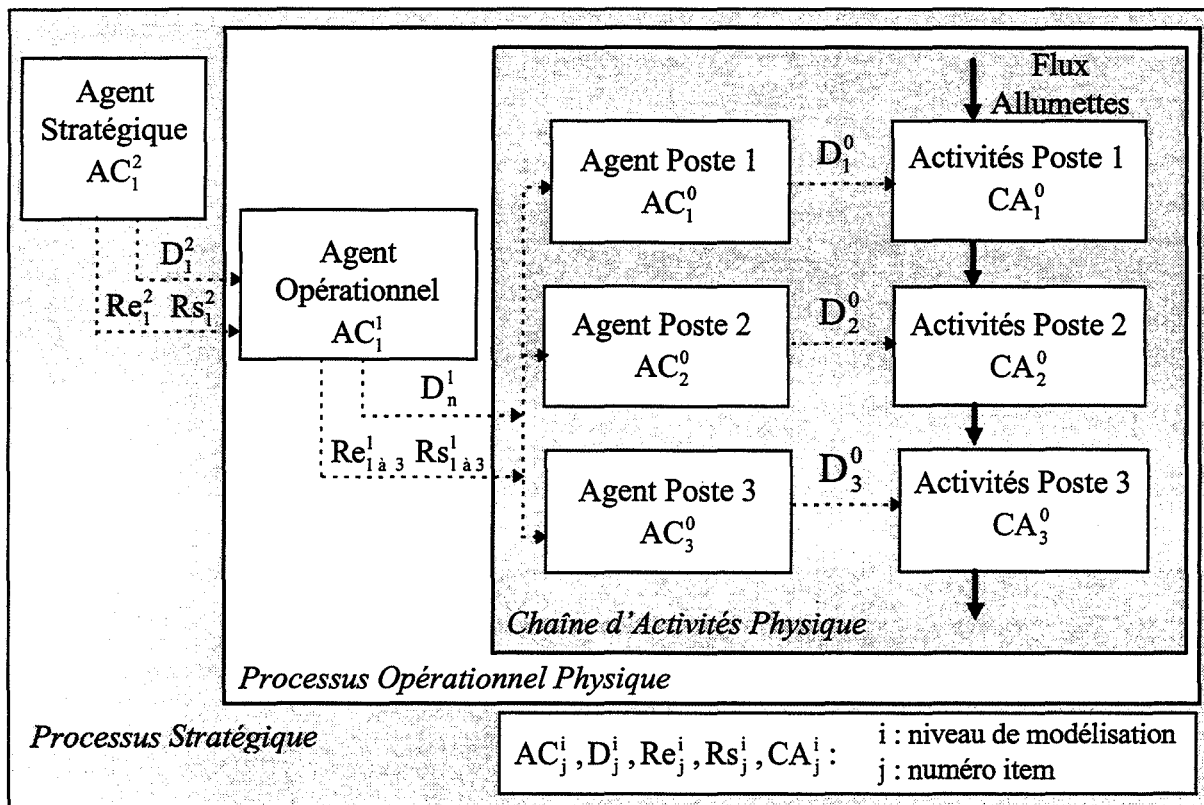


Figure VI.2 « Jeu des Allumettes : Modèle de Représentation Agents »

La structure organisationnelle hiérarchique représente les différents niveaux de l'organisation décrite, l'agent AC_1^2 (niveau stratégique) oriente la stratégie globale du système, il initialise le système et définit les grandes lignes du changement (en fonction des scénarios productiques), l'agent AC_1^1 du niveau opérationnel pilote globalement la chaîne d'activités et spécifie les

modes de gestion en fonction des rationalités et des décisions du niveau supérieur. Les agents $AC_{1\grave{a}3}^0$ du niveau chaîne d'activité physique gèrent les centres d'activités $CA_{1\grave{a}3}^0$ et mettent en œuvre, avec plus ou moins de latitudes décisionnelles (selon les scénarios), les décisions et rationalités des niveaux supérieurs.

2.3.2 Architecture des Agents

A partir de l'architecture générique d'un agent cognitif présentée dans le chapitre IV (cf. IV.4.1) nous allons décrire les différents modules et mécanismes constituant les agents cognitifs du modèle d'atelier du « Jeu des Allumettes » :

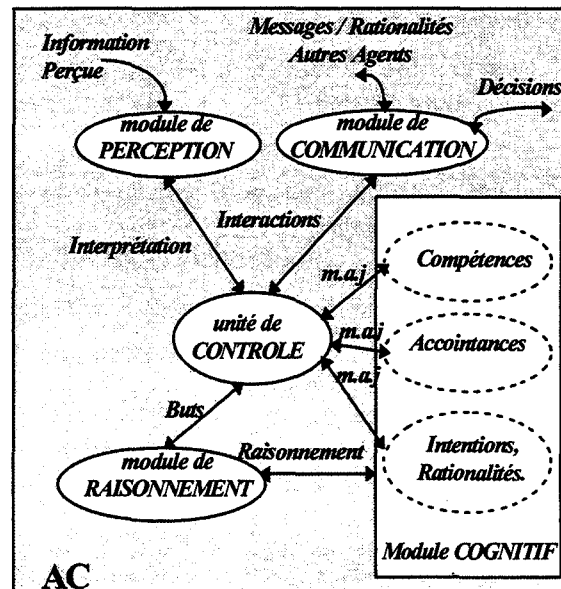


Figure VI.3 « Modélisation Agent d'un Centre de Décision »

Nous insisterons dans cette partie sur la représentation des connaissances (*module cognitif*) des différents agents. Les mécanismes de fonctionnement des différents modules et les processus de synchronisation avec les centres d'activités seront décrits explicitement dans le paragraphe suivant (modèle de simulation).

- **L'Agent Cognitif** AC_1^2 prend les décisions de réorganisation du processus opérationnel physique. Dans notre contexte de simulation, sa fonction principale sera d'initialiser le modèle

de simulation, c'est-à-dire que les changements de scénarios productiques se feront en fonction des paramètres d'activation (par l'utilisateur du système) de cet agent, qui transmettra des décisions et des rationalités à l'agent AC_1^1 pour la mise en place du nouveau mode de gestion. Pour cela, l'agent AC_1^2 dispose de la connaissance suivante au niveau de son module cognitif :

| | | |
|---|---|----------------------------|
| Accointances | | AC_1^2 |
| - AC_1^1 : c'est l'agent auquel il va transmettre ses décisions et rationalités | | |
| Intentions | | |
| - « Améliorer performance globale de l'entreprise » | | |
| Compétences | | |
| // Rationalités et décisions pour le niveau inférieur : a = scénario 1, b = scénario 2, c = scénario 3; | | |
| - Re2a : « Evaluation sur rendement maximum » | // Pour le Scénario 1 | |
| - Rs2a : « Pas de modification de la structure » | | |
| - Re2b : « Evaluation en fonction du taux de service client » | // Pour le Scénario 2 | |
| - Rs2b = Rs2c : « Possibilité de modification de la structure » | | |
| - Re2c : « Evaluation en fonction de réduction des stocks » | // Pour le Scénario 3 | |
| - D2a : « Produire un maximum » | | |
| - D2b : « Quantité à produire par semaine = 120 » | // correspond à la capacité moyenne de production | |
| - D2c : « Flux tiré » | | |
| // Connaissances de raisonnement | | |
| - Règle 1 : Si Scénario 1 Alors : Rationalités pour le niveau inférieur = Re2a & Rs2a | | |
| - Règle 2 : Si Scénario 1 Alors : Décision pour le niveau inférieur = D2a | | |
| - Règle 3 : Si Scénario 2 Alors : Rationalités pour le niveau inférieur = Re2b & Rs2b | | |
| - Règle 4 : Si Scénario 2 Alors : Décision pour le niveau inférieur = D2b | | |
| - Règle 5 : Si Scénario 3 Alors : Rationalités pour le niveau inférieur = Re2c & Rs2b | | |
| - Règle 6 : Si Scénario 3 Alors : Décision pour le niveau inférieur = D2c | | |

Le **module de raisonnement** de l'agent AC_1^2 va être activé avec pour objectif la création de décisions et de rationalités pour l'agent AC_1^1 , pour cela il va raisonner sur des méta-règles :

| | |
|---|----------------------------|
| Boucle : Attente signal de contrôle (activation) | AC_1^2 |
| <ul style="list-style-type: none"> - Si (Scénario == 1) Alors (Appliquer règles 1, 2); - Si (Scénario == 2) Alors (Appliquer règles 3, 4); - Si (Scénario == 3) Alors (Appliquer règles 5, 6); - signaler fin de raisonnement | |
| Fin Boucle | |

Nous verrons dans le modèle de simulation la manière dont ces raisonnements entraînent la création et la transmission de messages pour l'agent AC_1^1 par le biais du module de communication.

• **L'Agent Cognitif AC_1^1** : cet agent de niveau opérationnel met en oeuvre les décisions de réorganisation émises par le niveau stratégique. En fonction du scénario à appliquer, il va raisonner et déduire des décisions et des rationalités à transmettre aux agents de la chaîne d'activité physique ($AC_{1\rightarrow 3}^0$). Pour cela, *l'agent* AC_1^1 dispose des connaissances suivantes :

| | |
|---|----------------------------|
| <p><i>Accointances</i></p> <p>- $AC_1^2, AC_{1\rightarrow 3}^0$</p> | <p>AC_1^1</p> |
| <p><i>Intentions</i></p> <p>- « Satisfaire la rationalité évaluative de niveau supérieur »</p> | |
| <p><i>Rationalités</i></p> <p>// <i>Rationalités du niveau supérieur</i></p> <p>- Re = Re2a ou Re2b ou Re2c // Selon le scénario productique choisi par le niveau supérieur</p> <p>- Rs = Rs2a ou Rs2b</p> | |
| <p><i>Compétences</i></p> <p>// <i>Connaissances provenant du niveau supérieur (de la décision)</i></p> <p>- Demande = 120; // connaissances provenant de l'agent AC_1^2</p> <p>// <i>Connaissances propres à l'agent</i></p> <p>- Période = 240; // Correspond à une semaine de production</p> <p>- Périodicité = 5; // Nombre Jours de travail par semaine</p> <p>- Seuil de sécurité = 6, 8 ou 12; // Seuil maximum du stock aval d'un poste (cas du scénario 3)</p> <p>// <i>Informations Perçues</i></p> <p>- ProdC = xx; // Quantité produite pour la semaine précédente</p> <p>- Ventes = xx; // Quantité vendue pour la semaine précédente</p> <p>// <i>Traitements associés aux connaissances</i></p> <p>- Procédure 1 : D1b = Calcul de la quantité pour le niveau inférieur = Demande / Périodicité // (120/5)</p> <p>- Procédure 2 : Si (ProdC < Ventes) Alors (Augmenter Seuil Max des Stocks Avals);</p> <p style="padding-left: 40px;">D1c = 6, 8 ou 12;</p> | |

// Rationalités et Décisions pour le niveau inférieur : a = scénario 1, b = scénario 2, c = scénario 3;

- Re1a : « Evaluation au rendement »
- Rs1a : « Pas de latitudes décisionnelles »
- Re1b : « Evaluation en fonction de la satisfaction de la demande »
- Rs1b : « Possibilité de réajuster les quantités »
- Re1c : « Satisfaire le marché et limiter les stocks »
- Rs1c : « Respecter le stock de sécurité »
- D1a : « Vider le stock amont »
- D1b : « Quantité à produire par jour (Demande / Périodicité) »
- D1c : « Stock de sécurité »

// Connaissances de raisonnement

- Règle 1 : Si (Re2a & Rs2a) Alors : Rationalités pour le niveau inférieur = Re1a & Rs1a
- Règle 2 : Si (Re2a & Rs2a) Alors : Décision pour le niveau inférieur = D1a
- Règle 3 : Si (Re2b & Rs2b) Alors : Rationalités pour le niveau inférieur = Re1b & Rs1b
- Règle 4 : Si (Re2b & Rs2b) Alors : Appliquer Procédure 1;
- Règle 5 : Si (Re2c & Rs2b) Alors : Rationalités pour le niveau inférieur = Re1c & Rs1c
- Règle 6 : Si (Re2c & Rs2b) Alors : Appliquer Procédure 2;

• **Les Agents Cognitifs** $AC_{1\text{à}3}^0$: les agents du niveau chaînes d'activités pilotent les centres d'activités $CA_{1\text{à}3}^0$ en leur transmettant des décisions concernant la quantité d'allumettes à transformer. Ces quantités sont calculées en fonction des scénarios productiques.

| <i>Accointances</i> | |
|---|---------------------|
| - AC_1^1 | $AC_{1\text{à}3}^0$ |
| <i>Intentions</i> | |
| - « Satisfaire la rationalité évaluative de niveau supérieur » | |
| <i>Rationalités</i> | |
| - Re = Re1a, Re1b ou Re1c // selon le scénario choisi par le niveau stratégique - Rs = Rs1a, Rs1b ou Rs1c | |

Compétences

// Connaissances provenant du niveau supérieur

- Prod = 24; // Production prévisionnelle par jour (décision du niveau supérieur)
- StockMax = 6, 8 ou 12; // Seuil Maximum du stock Aval pour simuler le kanban

// Connaissances propres à l'agent

- NbJour = 5; // Nombre de jours de travail
- NbHeure = 8; // Nombre d'heure de travail par jour

// Informations perçues

- ProdJ = xx; // Production journée précédente
- ProdC = xx; // Cumul des Productions des journées précédentes
- NbJrest = xx; // Nombre de jours restant pour la semaine de production
- StockAmt = x; StockAval = x; // Etat des stocks amont et aval

// Traitements associés aux raisonnements

- Procédure 1 : « **Quantité** = StockAmt » // On vide le stock amont
- Procédure 2 : « $Q_j = (Prod - (ProdJ - Prod))$ » // Calcul de la Quantité pour la journée
 « $Q_j = (Q_j / NbHeure);$ » // Calcul de la Quantité par heure
 « **Quantité** = Min(Q_j , StockAmt) » // Quantité à produire en fonction du stock
- Procédure 3 : « $Q_j = ((NbJour * Prod - ProdC) / NbJrest)$ » // Calcul de la Quantité pour journées restantes
 « $Q_j = (Q_j / NbHeure);$ » // Calcul de la Quantité par heure
 « **Quantité** = Min(Q_j , Stock-Amt) // Quantité à produire en fonction du stock.
- Procédure 4 : « $Q_j = (StockMax - StockAval)$ » // Production en fonction du stock aval
 « **Quantité** = Min(Q_j , Stock-Amt) // Quantité à produire en fonction du stock.

// Décisions pour le centre d'activités

- DOa, DOb, DOc = « **Quantité** »

// Connaissances de raisonnement

- Règle 1 : Si (Rela & Rs1a) Alors : Appliquer Procédure 1;
- Règle 2 : Si (Relb & Rs1b) Alors : Appliquer Procédure 2; // Il y a deux manières de réajuster les
- Règle 3 : Si (Relb & Rs1b) Alors : Appliquer Procédure 3; // stocks (procédure 2 & 3)
- Règle 4 : Si (Relc & Rs1c) Alors : Appliquer Procédure 4;

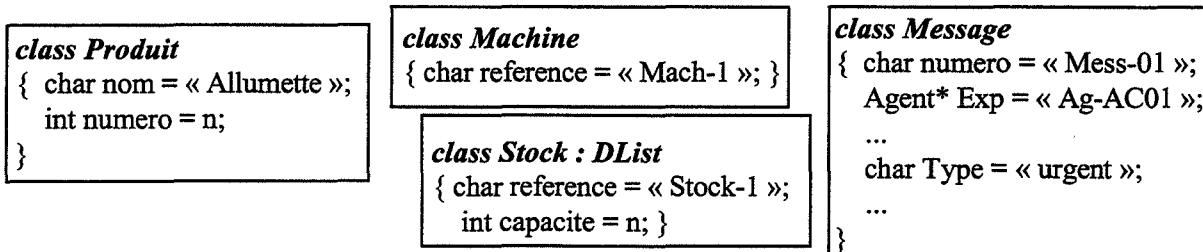
Le détail de fonctionnement des différents modules des agents cognitifs sera spécifié dans le paragraphe suivant concernant le modèle de simulation.

2.4 Le Modèle de Simulation

A partir des concepts et des outils orientés objets qui ont été présentés au chapitre V, nous allons transformer le modèle de représentation en modèle d'objets actifs. Les différentes classes d'objets sont détaillées comme suit :

2.4.1 Les « Entités de Transactions » et les « Moyens de Production »

Nous définissons pour cet exemple, relativement peu complexe, les classes d'objets nécessaires à la simulation du comportement du jeu des allumettes, elles sont décrites dans les instances de classes (cf. chapitre V) suivantes :



2.4.2 Les « Centres d'Activités »

La présentation des centres d'activités se fera en deux étapes, une première pour identifier l'ensemble des instances de la classe principale « CentreActivite », une seconde qui spécifiera leur comportement (script d'objets actifs). Les principaux centres d'activités nécessaires à la mise en oeuvre de ce modèle sont les trois centres d'activités de transformation d'allumettes.

```

class Transformation : CentreActivite
{ char identificateur = « Centre-CA01 »;
  Agent* agent = « Agent-ACO1 »;
  FileAttente* dec = « Decision »;
  Stock* stock-amont = « Stock-1 »;
  Stock* stock-aval = « Stock-2 »;
  Machine* Mach = « Mach-1 »;
}

```

Les machines ne sont pas partagées par ces centres d'activités, elles sont allouées à chaque centre explicitement et représentent des postes fixes. En plus de ces trois centres d'activités nous avons défini deux autres centres, générateur d'allumettes et marché, spécifiques à la simulation.

```

class Generateur : CentreActivite
{ char identificateur = « Generateur »;
  Stock* stock-aval = « Stock-1 »;
}

```

```

class Marche : CentreActivite
{ char identificateur = « Marche »;
  Stock* stock-amont = « Stock-4 »;
}

```

Les comportements de chacun de ces trois types de centres d'activités sont les suivants :

- « Centre d'Activités Transformation » : A partir d'une décision provenant de l'agent cognitif, il y a prise en compte de la quantité puis traitement (dès que les allumettes sont disponibles). Ce traitement est soumis à des aléas de fabrication représentés par le tirage du dé.

Process Transformer

```
{
  WaitForTrigger(Decision)           // Attente d'une décision de l'agent cognitif
  {
    CentreActivité->Etat(Active);     // L'état du centre d'activité est modifiée
    Quant = Decision.quantite();       // Récupération de la quantité d'allumettes à transformer
    Dé = Normal(xx)%6;                // Tirage aléatoire du dé
    Quant = Min(Dé,Quant);             // Quantité à produire entre la valeur du dé et la quantité décidée
    ...
    Stock-amont.Remove(Quant);         // Enlever la quantité d'allumettes du stock amont
    Wait (Dop);                        // Période de transformation (6)
    Stock-aval.Add (Quant);            // Transférer les allumettes dans le stock aval
    ...
    Send(Signale, ACO1);               // Envoyer signal de fin d'activité
    CentreActivité->Etat(Libre);       // L'état du centre d'activité redevient libre
  }
}
```

- « Centre d'Activité Générateur d'Allumettes » : Ce centre est également activé automatiquement au lancement de la simulation, il génère les allumettes (instanciation de la classe produit) qui vont initialiser le stock amont du premier centre d'activité.

Process Generateur

```
{
  WaitForTrigger(NbrProduit)          // Attente signal d'activation (nombre de produit à générer)
  {
    While (NbrProduit > 0)
    {
      Prod = new Produit;              // Création d'une nouvelle instance de la classe produit
      Stock-Aval->Add (Prod);           // Ajouter une allumette dans le stock aval
      NbrProduit--;                    // Décrementation du nombre d'allumettes à créer
    }
  }
}
```

- « Centre d'Activité Marché » : Ce centre est activé automatiquement au lancement de la simulation. Il boucle sur une période (toutes les heures), pour mettre en oeuvre un traitement qui consiste à retirer une quantité d'allumettes du stock aval du dernier centre d'activité de transformation. Cette quantité est calculée à partir d'une loi normale et va permettre de vider le stock des allumettes censées être vendues.

CHAPITRE VI

EXPERIMENTATION ET VALIDATION

Dans ce chapitre, nous présentons deux exemples d'application du processus de modélisation. Le premier, un exemple pédagogique centré sur le système physique, permettra de valider les techniques de simulation employées ; le second, s'inspirant d'une entreprise industrielle réelle, permettra quant à lui de vérifier la validité des différents modèles présentés, et de mettre en oeuvre les concepts cognitifs associés aux principes multi-agents.

Process Marche

```
{ Wait(Periode) // Boucle sur une période égale à une heure
{
    Quantite = Normal(Moy,Var)%6; // Tirage de la quantité représentant les « ventes »
    Qt = Stock-amont.numberIn() // Vérification de la quantité réelle en stock
    if (Qt >= Quantite)
    { Stock-amont.Remove(Quantite); // Enlever la quantité d'allumettes du stock amont
      Ventes = Ventes + Quantite // Incrémentation du compteur des ventes
    } else
    { Stock-amont.Remove(Qt); // Enlever la quantité d'allumettes du stock amont
      Ventes = Ventes + Qt // Incrémentation du compteur des ventes
    }
} }
```

2.4.3 Les « Agents Cognitifs »

Nous allons présenter tout d'abord l'implémentation de la partie statique (*module cognitif*) des agents cognitifs, puis nous spécifierons le fonctionnement de leur différents modules. Ceci sera illustré sur un exemple : l'agent AC_2^0 .

class Agent

// Exemple d'instance : agent AC02

AC_2^0

```
{
    char nom = « Agent-AC02 »; // Attributs caractéristiques
    Centre_Activite* centre2 = « Centre-CA02 »;
    ...
    ProdC = n; ProdJ = n; // Attributs de perception (cf. 2.2.2.2)
    Stock-2 = n; Stock-3 = n;
    ...
    BoiteLettres* BoiteL1 = « BoiteL-AC02 »; // Attributs de communication
    ...
    BoiteLettres* BoiteE1 = « BoiteE-AC02 »; // Attributs de contrôle (événements)
    ...
    BasedeK* base1 = « Base-R-AC02 »; // Attributs de raisonnement
    ...
    int Demande = 120; // Attributs du module cognitif
    int NbHeure = 8, Prod = 24; // données
    BasedeK* base2 = « Base-K-AC02 »; // Compétences (règles et traitements)
    ...
    char *Accointance[1] = { AC11 } // Accointances
    char* RatEva = « Re1b »; // Rationalités du niveau supérieur
    char* RatStr = « Rs1b »; ...
}
```

Le *module cognitif* de l'agent AC_2^0 est constitué d'un ensemble d'attributs hérités de la classe agent cognitif, d'attributs propres, et d'une base de connaissance « Base-K-AC02 » dans laquelle sont décrits les différentes règles et traitements (méthodes de calcul) définis dans le modèle de représentation.

| | |
|--|------------------------------|
| <pre> class BasedeK // exemple d'instance de la classe Base de connaissances { char identificateur = « Base-K-AC02 »; ... Base-K-AC02::Raisonne(char Decision) { If((RatEva == Re1a) & (RatStr == Rs1a)) then Decision = D0a; If((RatEva == Re1b) & (RatStr == Rs1b)) then Decision = D0b; If((RatEva == Re1c) & (RatStr == Rs1c)) then Decision = D0c; ... if(Decision == D0a) then { Procedure1() }; if(Decision == D0b) then { Procedure2() }; ... } ... Base-K-AC02::Procedure2(int Quantite) { int Qj = (Prod - (ProdJ - Prod)); // Quantité pour la journée Qj = Qj / NbHeure; // Quantité par Heure Quantite = Min(Qj, Stok-2) // La quantité à produire en fonction du stock amont } ... } </pre> | AC ₂ ⁰ |
|--|------------------------------|

A partir de ce *module cognitif*, l'agent AC₂⁰ va raisonner et communiquer des décisions (quantité à produire) au centre d'activité CA₂⁰. L'activation de ce module se fera par l'arrivée de messages (décision et de rationalités) du niveau supérieur (agent AC₁¹) qui seront pris en compte par le *module de communication* :

| | |
|---|------------------------------|
| <pre> Process Communication // Récupération des Messages dans la Boites aux Lettres { WaitForTrigger(BoiteL1) // Attente du signal de contrôle { ... if (Message.nature() == « Decision ») // Test la nature du message { if (Message.type() == « Urgent ») // Test le type du message if (Message.date() < BoiteL1.First(« urgent »)) // Positionne le message dans la { add(Message->First(« urgent »)) } // boîte aux lettres ... Signal-20 = new Mess-Decision(val1, val2, Val3); // Création d'un « Événement » Send(Signal-20). // Envoi signal à l'unité de contrôle. } ... } } </pre> | AC ₂ ⁰ |
|---|------------------------------|

Ce module de communication se chargera de signaler au *module de contrôle* l'arrivée d'une décision ou d'un message, qui entraînera une activation par ce dernier d'un raisonnement pour obtenir une réponse (principalement une décision pour le centre d'activité CA₁⁰).

| | |
|---|---|
| <pre> Process Control { ... WaitForTrigger(BoiteE1) // Attente événement { ... if (Mess-Decision) then // Test du message { Activate[Process(Raisonnement(decision))]; // Activation du raisonnement WaitForSignal(Process(Raisonnement)); // Attente du signal de fin ... Activate[Process(Communication(decision))]; // Activation de la communication } // de la décision au centre CA₁⁰ ... } } </pre> | <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">AC₂⁰</div> |
|---|---|

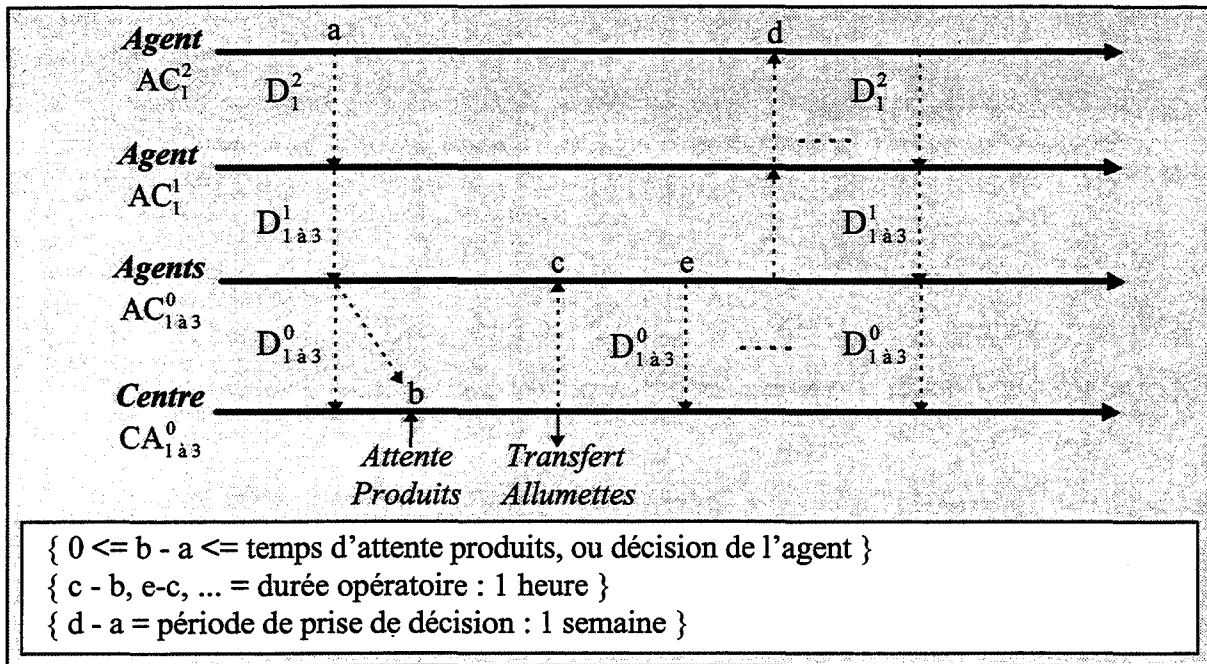
Le module de communication active donc un raisonnement sur un ensemble de connaissances (règles et traitements), de données du système, et d'informations perçues. Le **module de raisonnement** se charge de dérouler les règles et traitements définis dans la base « Base-K-AC02 » en fonction de méta-règles :

| | |
|---|---|
| <pre> Process Raisonnement { ... WaitForTrigger(Signal) // Attente signal d'activation du module de contrôle { ... if (Mess-Decision) then // Test le but du raisonnement { Base-K-AC02.Raisonne(Decision); // Lancement du raisonnement sur la base de ... // connaissance } Signal-25 = new Mess-Info(); // Création d'un « Événement » Send(Signal-25). // Envoi signal fin de raisonnement à l'unité de contrôle ... } </pre> | <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">AC₂⁰</div> |
|---|---|

Le **module de perception** quant à lui récupère les données indispensables : les stocks intermédiaires (en amont et en aval du poste), la production cumulée depuis le début de la période, ... Ces informations sont mises à jour périodiquement et constituent une partie des faits sur lesquels le module de raisonnement agira.

2.4.4 Fonctionnement Global du Modèle de Simulation

Pour illustrer les périodicités des prises de décision et les durées associées aux différents traitements, nous allons représenter sur un diagramme temporel les interactions entre les différents niveaux de modélisation pour un scénario donné :



A partir d'un interface utilisateur, il y a création des instances des différentes classes avec les attributs et paramètres associés. La première étape de la simulation consiste à activer les différents processus (objets actifs) à la date d'horloge 0, il y a donc génération d'allumettes pour le stock-1 et mise en attente (pour 1 heure) du processus marché.

L'agent AC_1^2 initialise le mode de gestion (scénario) choisi en créant (à la date 0) une décision et des rationalités pour l'agent AC_1^1 qui en fonction de ses connaissances va raisonner et envoyer des directives aux agents de niveau inférieur $AC_{1\text{à}3}^0$. Ces agents vont appliquer les traitements appropriés sur les données du système à cette date, et activer les centres d'activités $CA_{1\text{à}3}^0$ en leur transmettant la quantité d'allumettes à transformer. Ce processus va se répéter toutes les heures jusqu'à la fin de la semaine, date à laquelle l'agent AC_1^1 du processus opérationnel va envoyer de nouvelles directives pour la semaine suivante.

2.5 Exploitation et Résultats

Avant de simuler le comportement de cet atelier, selon chacun des trois scénarios, nous définissons certains paramètres : la durée des simulations, afin de prendre en compte l'existence d'un régime transitoire de démarrage, a été fixée à trois semaines ; le nombre de 15 simulations a été retenu pour réaliser des moyennes de performances sur un nombre suffisant d'échantillons.

La simulation des différents scénarios a permis d'analyser un certain nombre de paramètres et d'indicateurs de performances. Nous insisterons dans cette présentation sur des indicateurs concernant le flux physique : production écoulee et état des Stock-2 et Stock-3.

Les figures suivantes décrivent les résultats obtenus pour les différents scénarios, il faut signaler que les trois scénarios initiaux ont engendré un total de six « méthodes » à comparer :

- pour le scénario 1, « production maximum », une seule méthode de fonctionnement sera étudiée *méthode 1*, qui correspond à la procédure 1(cf. VI.2.3.2).

- pour le scénario 2, « ajustement de la quantité », deux méthodes ont été utilisées pour réajuster les quantités à produire par les agents du niveau chaîne d'activités : la première (*méthode 2*) concerne un réajustement pour la journée en fonction de la production du jour précédent, la seconde (*méthode 3*) permet à l'agent de réajuster sa production en fonction des jours restant et des quantités produites cumulées depuis le début de la période (respectivement procédures 2 et 3).

- pour le scénario 3, « méthode kanban », le nombre de kanban sera simulé par une limitation des stocks (seuils de sécurité) qui passe par différentes valeurs (6, 8 et 12) suivant trois méthodes (*méthode 4, 5 et 6*) issues de la procédure 4.

De plus, la capacité des postes de travail n'est pas identique, nous accentuerons les aléas de production en réduisant la capacité du dé à 4 pour certains postes. A titre d'exemple, dans le cas où la machine « goulot » se situe en fin de ligne, c'est-à-dire que la configuration des dés est : capacité $CA_1^0 = 6$, capacité $CA_2^0 = 6$, capacité $CA_3^0 = 4$, nous observons les résultats suivants :

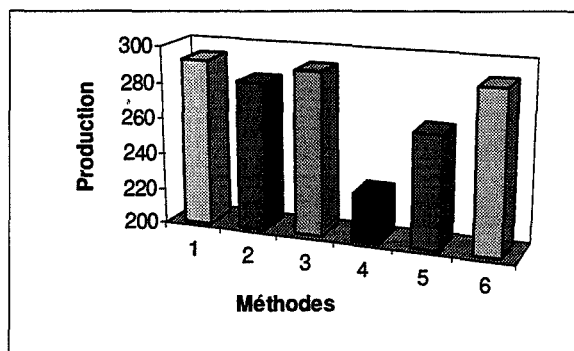


Figure VI.4 « Jeu des Allumettes : Production : configuration 6-6-4 »

Cet histogramme présente une comparaison des différentes productions en fonction des six méthodes de gestion. On remarquera que pour trois semaines de fonctionnement, les productions sont relativement comparables, de l'ordre de 290 pièces (pour une capacité moyenne de 300), pour les trois premières méthodes ; en ce qui concerne la gestion en flux tiré (*méthodes 4, 5 et 6*) le choix de la taille des stocks de sécurité (6, 8 et 12 allumettes) influence fortement la production.

En ce qui concerne l'état des files d'attente, la production maximum (*méthode 1*) engendre des stocks importants de l'ordre de 11 pièces en moyenne pour le stock-2 (entre poste 1 et 2) et de l'ordre de 52 pièces pour le stock-3 (entre poste 2 et 3). Les scénarios de réajustement (*méthodes 2 et 3*), et l'organisation de la gestion en flux tiré (*méthodes 4, 5, et 6*) réduisent fortement les stocks intermédiaires, mais le fait que la machine « goulot » se situe en fin de ligne fait apparaître une augmentation relative du stock-2 selon la capacité de cette machine.

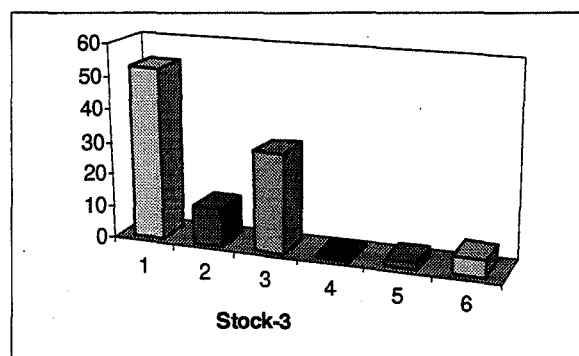
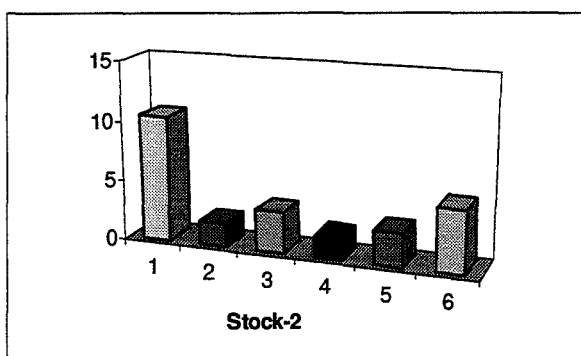


figure VI.5 « Jeu des Allumettes : Etats des Stocks : configuration 6-6-4 »

Les résultats complets de ces simulations (pour les différentes configurations) sont décrits dans l'Annexe C.

2.6 Conclusion

Les résultats obtenus à travers ce modèle d'atelier issu du jeu des allumettes ne font que confirmer le fait que selon la volonté stratégique affichée par l'entreprise (produire un maximum, limiter les stocks, ...) les performances, en terme d'indicateurs physiques de production, sont sensiblement différentes.

L'intérêt de ce premier modèle n'est évidemment pas de faire apparaître de nouveaux concepts de gestion ; rappelons qu'il a été construit pour quatre raisons importantes :

❶ permettre la mise en oeuvre du processus de modélisation sur un exemple relativement simple afin d'effectuer une première validation des différents modèles.

❷ tester les capacités du modèle de simulation orienté objets en termes de réactions aux aléas et de synchronisation de processus, et vérifier ainsi sa fiabilité et sa robustesse.

❸ confirmer la possibilité de changements organisationnels importants (passage du flux poussé au flux tiré par exemple) dynamiquement, en modélisant la structure décisionnelle par des concepts d'agents cognitifs distribués qui orientent les processus physiques.

❹ valider la réutilisabilité du modèle de simulation objets : en effet, l'implémentation du modèle suivant (entreprise industrielle) est issue des mêmes modules de base (agents, centres d'activités, ...) enrichis (ajout de méthodes, de processus, ...).

Après cette première phase concluante de validation, le prochain cas d'étude va nous permettre de représenter de manière plus complète les processus cognitifs, et d'analyser les comportements décisionnels distribués et autonomes.

3 UN EXEMPLE INDUSTRIEL

Pour mettre en oeuvre notre méthodologie sur une situation productique proche de la réalité, nous avons opté pour un modèle d'entreprise représentatif de PMI de sous-traitance. Pour le configurer nous nous sommes inspirés d'une entreprise de la région Rhône-Alpes qui se situe dans la problématique industrielle (environnement incertain et instable, réduction des délais,...) définie dans le chapitre I.

3.1 Présentation de l'Entreprise

Nous allons dans un premier temps décrire l'entreprise, nommée « *PMI* », dans son environnement, puis nous présenterons les processus et les transformations qui s'y déroulent.

3.1.1 L'entreprise « PMI »

L'entreprise *PMI* emploie une centaine de personnes, elle a développé depuis le début du siècle une activité centrée sur le métier de la découpe et de l'assemblage de pièces de tôlerie. Elle est actuellement spécialisée dans la fabrication de produits de type métalliques, dont la production est de l'ordre de 60 000 par an. Le processus de fabrication de ces produits se décompose en trois étapes principales :

- ⇒ la préparation des tôles (cisailage, découpe, emboutissage, pliage, ...),
- ⇒ l'assemblage de composants (essentiellement par soudage),
- ⇒ le traitement de surface (peinture).

Ces étapes sont organisées en sections homogènes associées à des temps de transferts importants qui allongent les délais de fabrication. De plus, les temps de changement d'outils sont élevés (plusieurs heures) ce qui justifie des lancements de tailles importantes. La figure VI.6 décrit le système physique et la structure décisionnelle qui l'anime. Cette structure décisionnelle décline les prévisions commerciales en programme de production, puis en ordres de fabrication (O.F) à partir d'un calcul des besoins et d'un module d'ordonnancement informé de l'état des stocks et des en-cours de fabrication.

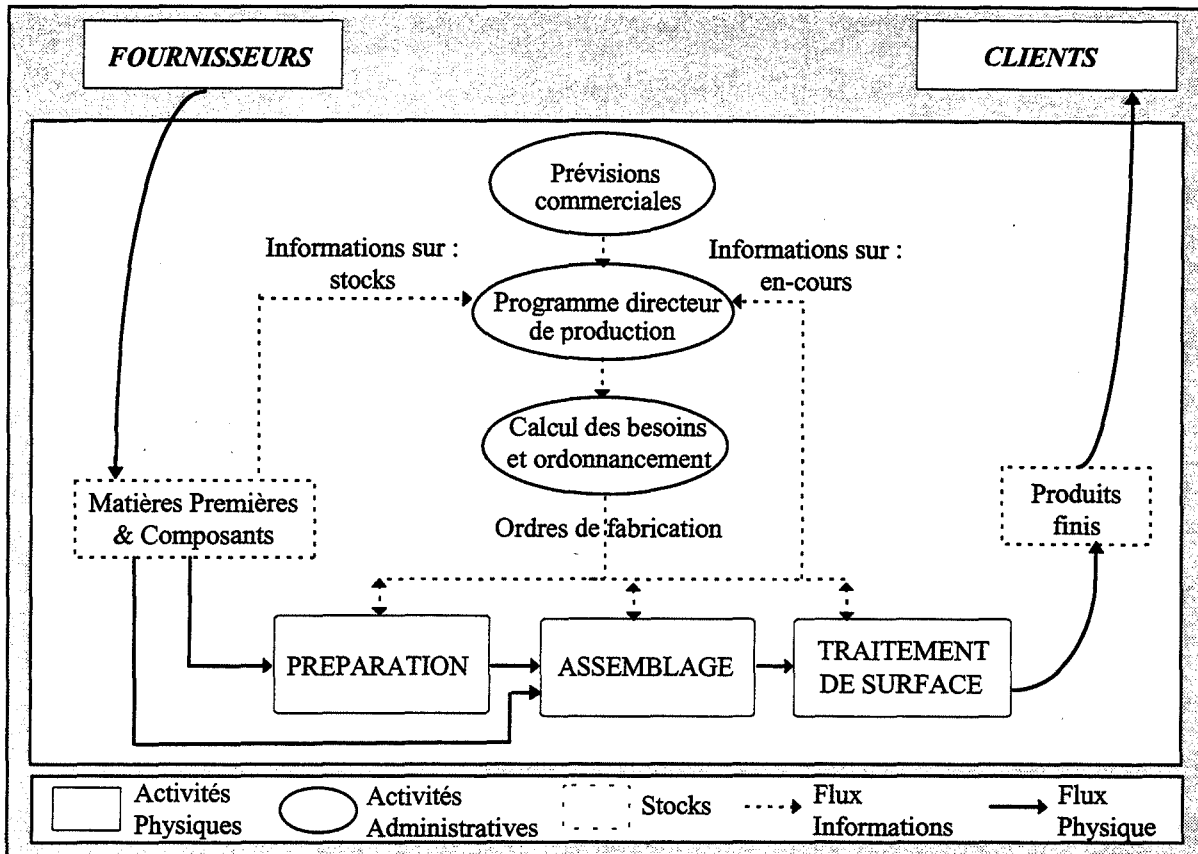


Figure VI.6 « Entreprise PMI : Les Systèmes Physiques et Décisionnels »

3.1.2 Le Contexte Industriel

Les évolutions récentes du marché caractérisées par des exigences en termes de : qualité, délais et coûts, ont poussé l'entreprise à modifier son processus de fabrication. Elle a en particulier pris l'engagement vis-à-vis de ses clients de baisser les prix de ventes de ses produits, d'améliorer sa flexibilité et d'intégrer la phase de conception des produits dans son savoir-faire.

Des changements organisationnels importants ont donc été formalisés en son sein par un projet productique stratégique dont les objectifs sont les suivants :

- réduction du délai entre l'arrivée d'une commande et la livraison du produit,
- flexibilité,
- réduction des coûts totaux de production.

Ces objectifs correspondent parfaitement à la problématique actuelle des systèmes industriels : d'une part, les méthodes employées pour le projet productique renvoient aux techniques

d'amélioration de la flexibilité et de l'intégration, en particulier, l'utilisation d'outils associés à la démarche juste-à-temps : système kanban de pilotage de la production, méthode SMED de changement rapide d'outils, démarche qualité, ... D'autre part, ce projet possède une forte dimension collective, en effet la mise en oeuvre des transformations passe par la mobilisation de l'ensemble des acteurs de l'organisation, et par leur adhésion à un objectif commun.

3.1.3 Scénarios Productiques Étudiés

Les différents scénarios productiques que nous allons présenter vont nous permettre d'étudier et d'analyser le comportement de l'entreprise *PMI* avant et après les changements organisationnels stratégiques qui y ont été effectués :

❶ Le premier scénario est relatif à la configuration initiale de l'entreprise : le processus physique (de type flux poussé) est géré par processus administratif (système MRP cf. Annexe A) ; les tailles de lots sont relativement importantes, ce qui engendre des stocks élevés entre les postes. Les décisions sont déclinées d'un niveau à l'autre de manière hiérarchique. Il y a très peu de latitudes décisionnelles, et les acteurs qui pilotent le flux physique respectent parfaitement les listes d'OF qu'ils reçoivent.

❷ Le second scénario correspond à une évolution de l'organisation dans laquelle les acteurs décisionnels du niveau le plus bas ont une certaine autonomie de fonctionnement et gèrent les flux matières avec plus de degrés de liberté. La gestion est toujours de type MRP, mais nous verrons que les agents qui pilotent les activités physiques vont négocier auprès des agents du processus administratif pour concevoir des listes d'OF en fonction de leurs rationalités. De même une situation de type « prise de décision collective » sera représentée dans ce scénario.

❸ Le troisième scénario représente une évolution encore plus importante de l'organisation qui va passer d'un système en flux poussé à un système en flux tiré de type juste-à-temps (cf. Annexe A) avec mise en place du kanban. Le processus administratif sera donc supprimé.

Ces trois scénarios constituent des processus stratégiques de l'entreprise, le passage de l'un à

l'autre nécessitera une réorganisation globale des processus opérationnels. Ils seront simulés dans différentes situations (avec ou sans aléas) en fonction d'un marché variable.

Après cette description de l'entreprise et du contexte industriel, nous allons à présent entamer la mise en oeuvre du processus de modélisation.

3.2 Le Modèle de Compréhension

Nous identifions tout d'abord les différents processus de l'organisation :

3.2.1 Modélisation sous forme de Processus

① *Le processus stratégique* : l'évolution organisationnelle définie en fonction du contexte industriel sera représentée dans le modèle de compréhension (fig. VI.7) par l'intégration d'un niveau supérieur qui modélise les processus stratégiques. Ces processus vont guider et orienter les transformations profondes de l'entreprise en améliorant les processus opérationnels.

② *Le processus administratif de traitement d'informations* qui transforme les prévisions commerciales et les commandes clients en ordres de fabrications. Ce processus opérationnel est représenté par une chaîne d'activités et un centre de décision qui la pilote. Cette chaîne est elle-même formée de modules de niveau inférieur, constitués chacun par un centre d'activités et par un centre de décision. A titre d'exemple, le centre d'activités de calcul des besoins transforme un programme directeur de production exprimé en quantités de produits à fabriquer par mois, en une liste de besoins exprimée en articles à fabriquer chaque semaine. Le centre de décision de calcul des besoins a un rôle de configuration des paramètres de ce module, il règle en particulier la fréquence du calcul, et les stocks de sécurité pour chaque article.

③ *Le processus de transformation physique* des matières premières en produits finis est également représenté par une chaîne d'activités et un centre de décision. Chaque centre d'activités regroupe les opérations élémentaires (préparation, assemblage, et traitement de surface), et est dirigé par un centre de décision qui pilote les opérations de transformation.

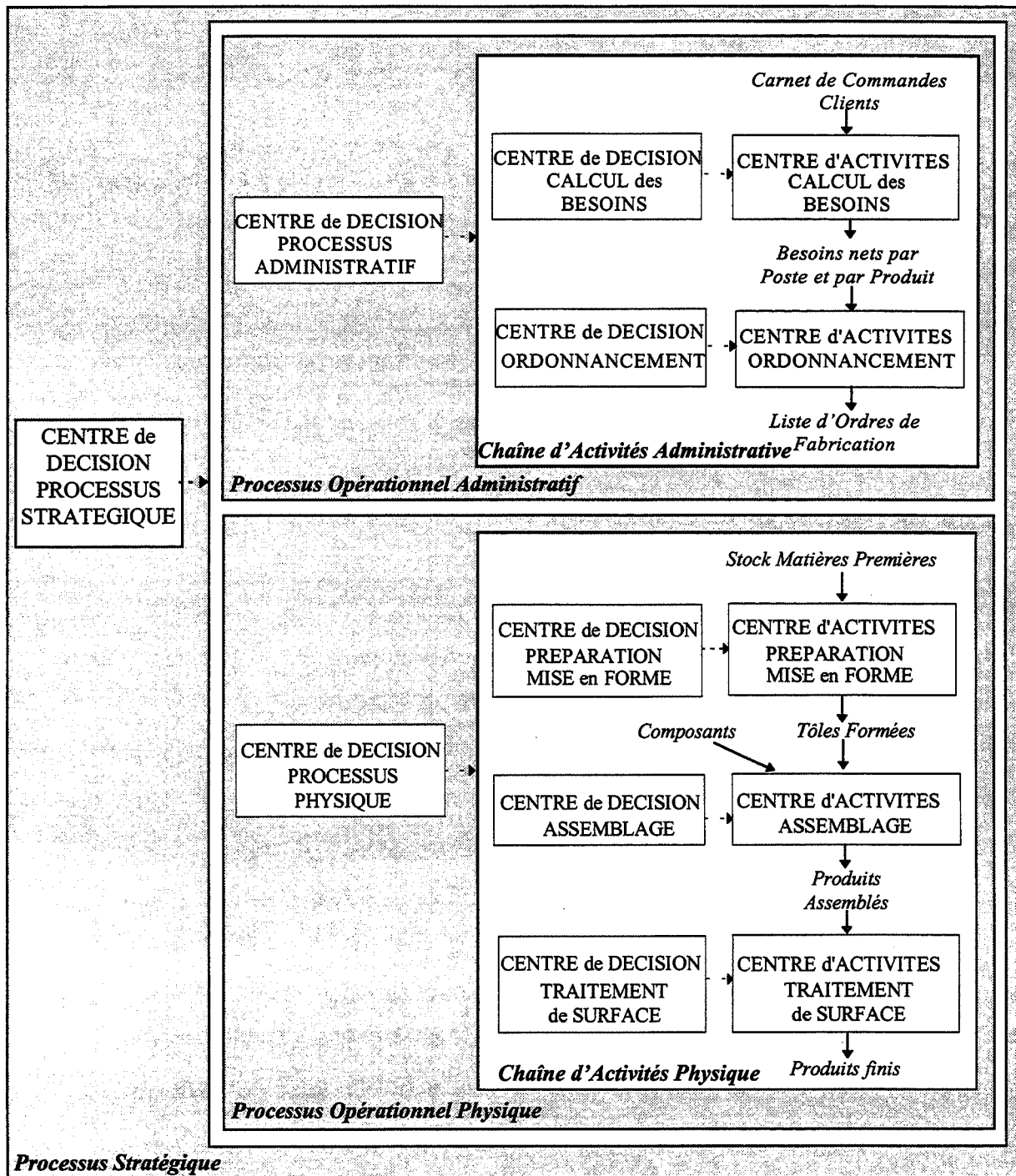


Figure VI.7 « Entreprise PMI : Le Modèle de Compréhension »

3.2.2 Les Composants du Système

Par rapport à cette vision du système, nous allons définir les quatre grandes classes d'entités qui représentent l'ensemble des composants de l'organisation :

- Les « Entités de Transactions » : ce sont les entités, aussi bien physiques qu'informationnelles, qui vont circuler dans le système. On définit : des matières premières, deux types de produits (A et B), des ordres de fabrication (O.F), un carnet de commandes clients, des décisions, des gammes de fabrication et opérations associées, des messages, ...

- Les « Moyens de Production » : ensemble des ressources qui interviennent dans le fonctionnement du système, principalement : les machines et les différents stocks.

- Les « Centres d'Activités » : Ils sont au nombre de deux au niveau de la chaîne d'activité administrative (le flux principal est constitué en entrée du carnet de commandes clients et en sortie de la liste d'O.F par poste et par produit), et de trois au niveau de la chaîne d'activité physique (le flux principal est constitué des deux types de produits A et B).

- Les « Centres de Décision » : ils orientent (aux différents niveaux) la gestion et le fonctionnement des centres d'activités. Au niveau de la chaîne d'activités administrative, ils vont transmettre aux centres d'activités les paramètres nécessaires au calcul des besoins (stock de sécurité) et à l'établissement de la liste d'O.F (taille de lot). Au niveau de la chaîne d'activités physique ils vont piloter les centres d'activités en définissant les quantités et les types de pièces à produire (A ou B).

Pour cela, les centres de décision ont besoin de rationalités et de décisions des niveaux supérieurs et d'un ensemble de connaissances et d'informations sur le fonctionnement du système. Ces connaissances seront détaillées dans le paragraphe suivant.

3.3 Le Modèle de Représentation à Base d'Agents

Ce niveau de modélisation consiste à décrire de manière plus fine les mécanismes de prise de décisions. Pour cela nous allons passer d'un concept de centre de décision à un concept d'agents cognitifs dans lesquels seront formalisés les phénomènes d'orientation des comportements cognitifs des acteurs décisionnels.

3.3.1 Organisation des Agents

Nous allons spécifier les trois types d'organisation définis dans le chapitre IV (cf. paragraphe 3) : une structure de type hiérarchique qui permet de modéliser l'organisation dans le cas du scénario 1 (hiérarchie directive), une structure de dépendance dans le cas des scénarios 2 et 3 (Autonomie et Kanban) pour étudier les comportements des agents en termes de communication et de négociation, et une structure de type effet de groupe pour représenter dans le scénario 2 les cas de prise de décision collective et de résolution de conflits.

Nous n'allons pas redéfinir les mécanismes d'implémentation des agents cognitifs (détaillés dans l'exemple précédent), nous insisterons surtout sur la description des phénomènes cognitifs (négociation entre agents, coopération, conflits, ...), et sur la connaissance nécessaire pour évoluer dynamiquement d'une situation productique à l'autre.

3.3.2 Architecture des Agents

Nous reprenons donc la représentation de l'entreprise *PMI* depuis les processus stratégiques jusqu'aux chaînes d'activités, en spécifiant pour chacun de ces niveaux les agents cognitifs concernés.

3.3.2.1 Le processus stratégique

Il est constitué d'un agent cognitif, noté AC_1^2 , qui oriente les deux processus opérationnels.

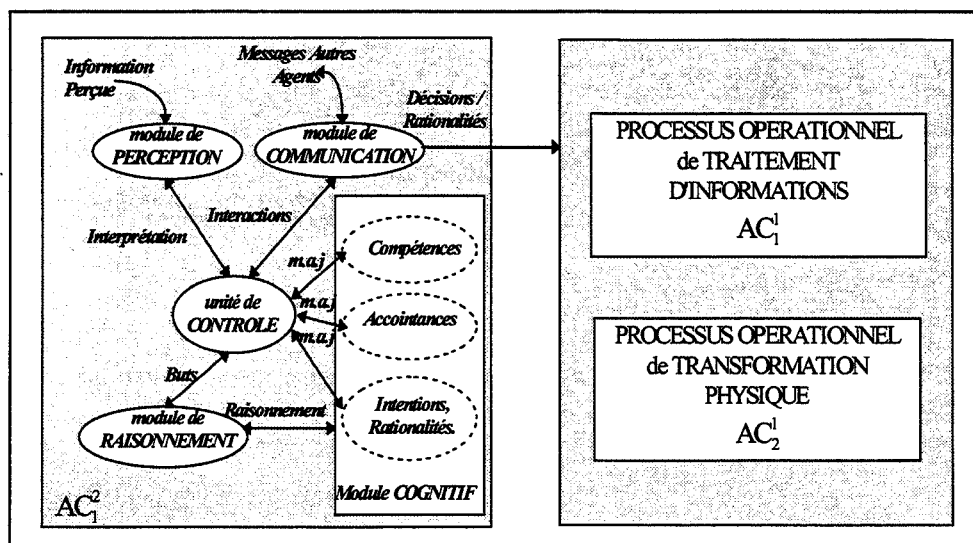


Figure VI.8 « Entreprise PMI : Modélisation Agents du Processus Stratégique »

Nous présentons ci-après le *module cognitif* de l'agent AC_1^2 en illustrant les décisions et rationalités qui sont transmises au niveau inférieur.

| | | |
|---|--|----------|
| <i>Accointances</i> | | AC_1^2 |
| - AC_1^1, AC_2^1 | | |
| <i>Intentions</i> | | |
| - « Améliorer la performance globale de l'entreprise » | | |
| <i>Compétences</i> | | |
| // Rationalités pour le niveau inférieur | | |
| • scénario 1 (Flux Poussé) : | | |
| - Re_1^2 : « Taux de service client ». | | |
| - Rs_1^2 : « Pas de modification de la structure de décision administrative » | | |
| - Re_2^2 : « Rendement physique de la chaîne de fabrication ». | | |
| - Rs_2^2 : « Pas modification de la structure de décision physique » | | |
| • scénario 2 (autonomie) : | | |
| - Re_1^2 : « Taux de service client ». | | |
| - Rs_1^2 : « Possibilité de modification de la structure de décision administrative » | | |
| - Re_2^2 : « Rendement physique de la chaîne de fabrication ». | | |
| - Rs_2^2 : « Possibilité de modification de la structure de décision physique » | | |
| • scénario 3 (flux tiré) : | | |
| // Le processus administratif n'existe plus : les Agents | | |
| - Re_2^2 : « Taux de service client ». | | |
| // $AC_2^1, AC_{1\text{ à }2}^0$ ne sont pas activés. | | |
| - Rs_2^2 : « Possibilité de modification de la structure de décision physique » | | |
| <i>Décisions</i> | | |
| - D_1^2, D_2^2 : « Les scénarios à mettre en oeuvre » | | |

3.3.2.2 Le processus opérationnel de traitement administratif (fig. VI.9)

Il est constitué d'un agent cognitif de niveau supérieur, noté AC_1^1 , qui pilote une chaîne d'activités CA_1^1 constituée de deux centres d'activités : un centre d'activités de calcul des besoins de type MRP (CA_1^0), et un centre d'activités d'ordonnancement (CA_2^0) pilotés respectivement par les agents cognitifs AC_1^0 et AC_2^0 . L'objectif de ce processus est de fournir une liste d'ordres de fabrication ordonnancée à partir d'un carnet de commandes clients.

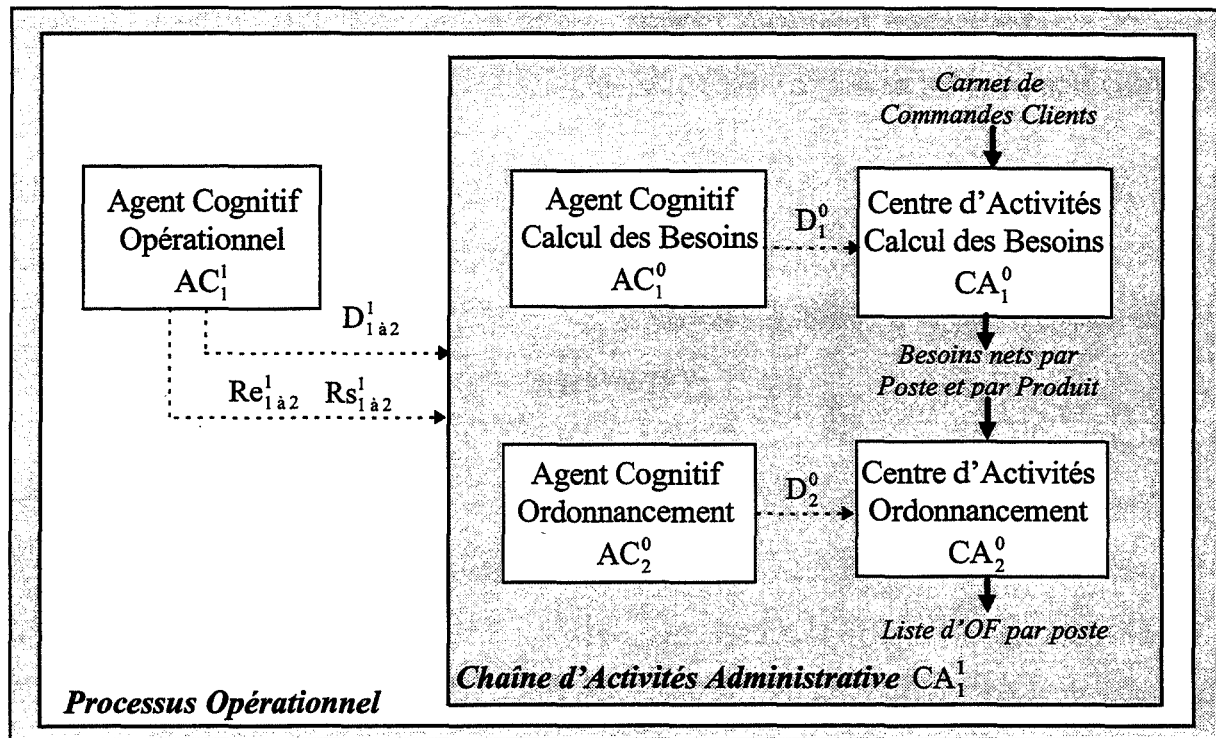


Figure VI.9 «Entreprise PMI : Modélisation Agents du Processus Administratif »

L'Agent cognitif : AC_1^1

| | |
|--|----------------------------|
| Accointances | |
| - AC_1^2 , AC_2^1 , AC_1^0 , AC_2^0 | AC_1^1 |
| Intentions | |
| - « Satisfaire la rationalité évaluative ». | |
| Rationalités | |
| cf. Agent AC_1^2 : rationalités pour le niveau inférieur | |
| Compétences | |
| - Règle 1 : Si « MRP et ordonnancement » Alors « Amélioration du taux de service client » | |
| - Règle 2 : Si « Tailles de lot diminue » Alors « Taux de service client » // | |
| Rationalités pour le Niveau Inférieur | |
| - $Re_{1 \rightarrow 2}^1$: « Taux de service client » // Correspond aux ventes de produit par heure (cf. VI.3.5.1.2) | |
| - $Rs_{1 \rightarrow 2}^1$: « Libre choix sur les stocks de sécurité » | |
| - $Rs_{1 \rightarrow 2}^1$: « Libre choix sur les tailles de lot » | |
| Décisions | |
| - D_1^1 , D_2^1 : « Déterminer une liste d'O.F par semaine » | |

Agent cognitif : AC_1^0

| | |
|--|----------------------------|
| <i>Accointances</i> | AC_1^0 |
| - AC_1^1 | |
| <i>Intentions</i> | |
| - « Satisfaire la rationalité évaluative ». | |
| <i>Rationalités</i> | |
| cf. Agent AC_1^1 : rationalités pour le niveau inférieur | |
| <i>Compétences</i> | |
| - Règle 1 : <i>Si</i> « Stocks de sécurité importants » <i>Alors</i> « Taux de service client est élevé ». | |
| <i>Décision</i> | |
| - D_1^0 : « stock de sécurité (par type de pièce) en aval de chaque poste de la chaîne physique » | |

Agent cognitif : AC_2^0

| | |
|--|----------------------------|
| <i>Accointances</i> | AC_2^0 |
| - AC_1^1 | |
| <i>Intentions</i> | |
| - « Satisfaire la rationalité évaluative ». | |
| <i>Rationalités</i> | |
| cf. Agent AC_1^1 : rationalités pour le niveau inférieur | |
| <i>Compétences</i> | |
| - Règle 1 : <i>Si</i> « Tailles de lot sont diminuées » <i>Alors</i> « Taux de service clients s'améliore ». (ce qui incite à diminuer les tailles de lot, au détriment du rendement physique des opérations) | |
| <i>Décision</i> | |
| - D_2^0 : « Taille de lot pour la fabrication des pièces A et B sur chaque poste de la chaîne physique » | |

3.3.2.3 Le processus opérationnel de transformation physique (fig. VI.10)

Il est également constitué d'un agent cognitif de niveau supérieur, noté AC_2^1 , qui pilote une chaîne d'activités CA_2^1 . Cette chaîne est elle même constituée de trois centres d'activités $CA_{3\text{ à }5}^0$ (correspondant aux trois étapes du processus de fabrication) orientés par des agents de niveau propre $AC_{3\text{ à }5}^0$.

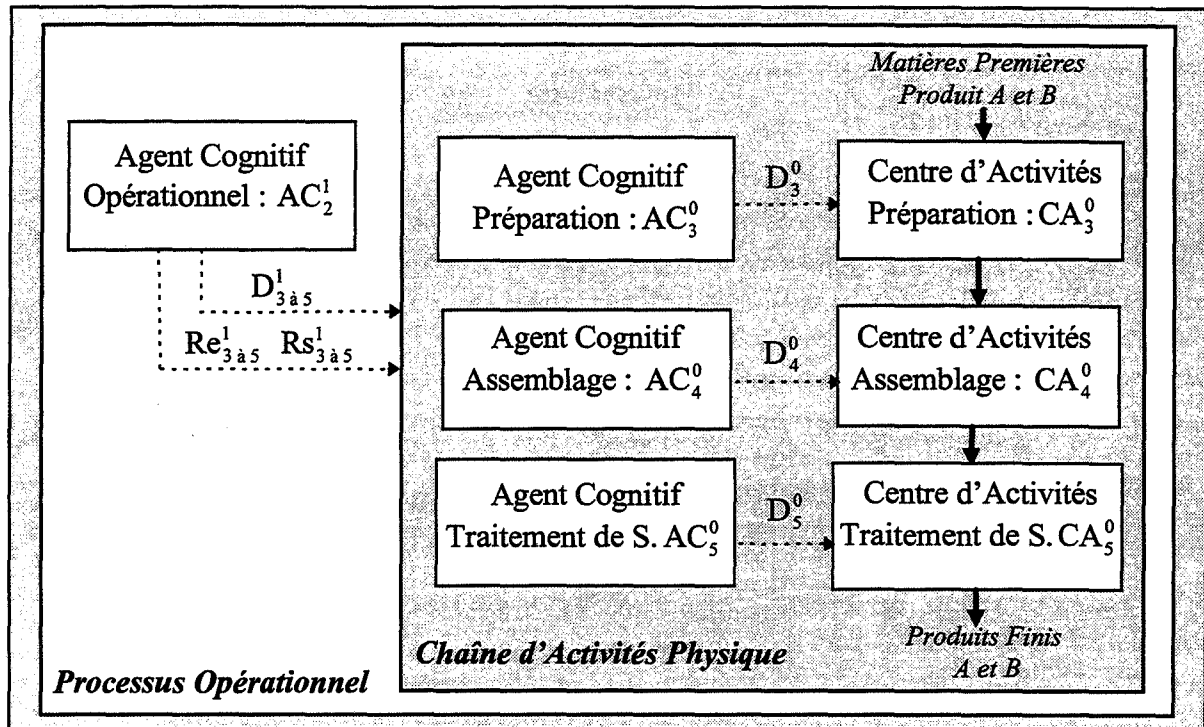


Figure VI.10 « Entreprise PMI : Modélisation Agents du Processus Physique »

L'agent cognitif AC_2^1 représente l'activité cognitive du chef de fabrication, il perçoit les informations qui constituent la sortie de la chaîne administrative (liste d'ordres de fabrication par poste) et les transmet aux agents $AC_{3\text{ à }5}^0$ après les avoir éventuellement modifiées selon ses intentions propres. Cette relation établit le lien entre la chaîne administrative de gestion de production et la chaîne d'activités physique dans laquelle deux produits A et B sont réalisés.

L'Agent cognitif : AC_2^1

| | | |
|---|--|----------------------------|
| Accointances | | AC_2^1 |
| - $AC_1^2, AC_1^1, AC_3^0, AC_4^0, AC_5^0$ | | |
| Intentions | | |
| - « Satisfaire la rationalité évaluative » | | |
| Rationalités | | |
| cf. Agent AC_1^2 : rationalités pour le niveau inférieur | | |
| Compétences | | |
| • <u>scénario 1 (flux poussé)</u> | | |
| - Règle 1 : Si « Respect de la liste d'O.F » Alors « Taux de service client est satisfaisant » | | |
| - Règle 2 : Si « Nombre de changements d'outils réduit » Alors « Amélioration du rendement physique » | | |

| |
|--|
| <p>- Règle 3 : Si « Lots sont regroupés » Alors « Nombre de changements d'outils est réduit »</p> <p>• <u>scénario 2 (autonomie)</u> :</p> <p>- Règle 4 : Si « niveau inférieur peut réordonnancer les O.F » Alors « rendement et taux de service client s'améliorent ».</p> <p>• <u>scénario 3 (flux tiré)</u> :</p> <p>- Formule de calcul du nombre d'étiquettes kanban à mettre en circulation.</p> <p>- Formule de calcul de seuil de déclenchement (nombre de kanban minimum).</p> <p>- Règle 5 : Si « Nombre d'étiquettes en circulation est réduit » Alors « Réduction des stocks ».</p> |
| <p style="text-align: center;">Rationalités pour le niveau inférieur</p> <p>• $Re_{3 \text{ à } 5}^1$:</p> <p><i>scénario 1 (flux poussé)</i> : Respect de la liste d'ordres de fabrication.</p> <p><i>scénario 2 (autonomie)</i> : Rendement physique du poste</p> <p><i>scénario 3 (flux tiré)</i> : Suivi du planning kanban.</p> <p>• $Rs_{3 \text{ à } 5}^1$:</p> <p><i>scénario 1 (flux poussé)</i> : Pas de latitude de décision sur les ordres de fabrications.</p> <p><i>scénario 2 (autonomie)</i> : Permutations autorisées sur la liste d'ordres de fabrication.</p> <p><i>scénario 3 (flux tiré)</i> : Choix des quantités et des types de pièces à fabriquer.</p> |
| <p style="text-align: center;">Décisions</p> <p>• <u>scénario 1 et 2</u> : $D_{3 \text{ à } 5}^1$: « liste d'OF (quantité et type de produit par poste) »</p> <p>• <u>scénario 3</u> :</p> <p>- $D_{3 \text{ à } 5}^1$: « nombre de kanban à mettre en circulation & seuil de déclenchement pour chaque référence ».</p> |

Agents cognitifs : $AC_{3 \text{ à } 5}^0$

| | |
|--|--|
| <p style="text-align: center;">Accointances</p> <p>- AC_2^1</p> | <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">$AC_{3 \text{ à } 5}^0$</div> |
| <p style="text-align: center;">Intentions</p> <p>- « Satisfaire la rationalité évaluative ».</p> | |
| <p style="text-align: center;">Rationalités</p> <p>cf. Agent AC_2^1 : rationalités pour le niveau inférieur</p> | |
| <p style="text-align: center;">Compétences</p> <p>• <u>scénario 2 (autonomie)</u> :</p> <p>- Règle 3 : Si « Machine n'exécute pas un O.F » Alors « Rendement physique baisse ».</p> | |

| |
|---|
| <p>- Règle 4 : Si « Permutation d'O.F autorisée » Alors « choisir O.F pour lequel pièces disponibles ».</p> <p>- Règle 5 : Si « Lots sont regroupés par types » Alors « Nombre de changements d'outil est réduit ».</p> <p>- Règle 6 : Si « Nombre de changement d'outils est réduit » Alors « Rendement physique s'améliore ».</p> <p>(Les agents auront tendance à regrouper les lots de pièces identiques de façon à minimiser le nombre de changements d'outil, au détriment du taux de service client global).</p> <p>• <u>scénario 3 (flux tiré)</u> :</p> <p>- Règle 7 : Si « Nombre d'étiquettes dépasse seuil de lancement » Alors « Production autorisée »</p> <p>- Règle 8 : Si « Plusieurs références autorisées en même temps » Alors « choisir référence la plus remplie »</p> <p>- Règle 9 : Si « une référence est choisie » Alors « Produire quantité égale au nombre d'étiquettes »</p> |
| <p style="text-align: center;">Décisions</p> <p>- $D_{3 \text{ à } 5}^0$: « Quantité et type de pièce à produire sur le poste ».</p> |

Après cette description des modules cognitifs qui forment l'expertise et les compétences des agents, nous allons à présent décrire brièvement la phase d'exploitation dynamique du modèle.

3.4 Le Modèle de Simulation

Le passage au modèle de simulation revient à définir un ensemble d'objets actifs qui vont communiquer et se synchroniser pour simuler le fonctionnement du modèle de l'entreprise. Nous insisterons dans cette partie sur la présentation du fonctionnement des centres d'activités.

3.4.1 Les « Entités de Transactions » et les « Moyens de Production »

Nous définissons, à ce niveau, les classes d'objets nécessaires à la simulation du comportement de l'entreprise *PMI*, elles sont décrites dans les instances de classes suivantes :

| | | |
|--|--|--|
| <pre>class Produit { char nom = « A »; int numero = n; Gamme* gamme = « Gam-1 »; }</pre> | <pre>class Gamme { char gamme = « Gam-1 »; Operation* opt = [Op1, Op2]; }</pre> | <pre>class Operation { char operation = « Op1 »; Machine* mach = « Mach-1 »; }</pre> |
| <pre>class Machine { char reference = « Mach-1 »; }</pre> | <pre>class Stock : DList { char reference = « Stock-1 »; int capacite = n; }</pre> | <pre>class OF { int numero = n; char type = « A »; int quantite = « 20 »; }</pre> |

class CarnetDC

```
{ int reference = n;
  char client = « xxxx »;
  char type = « B »;
  int quantite = « 200 »;
}
```

class Message

```
{ char numero = « Mess-01 »;
  Agent* Exp = « Ag-AC01 »;
  ...
  char Type = « urgent »;
}
```

class Organisation

```
{ char nom = « Proc-Adm;
  char type = « Administratif »;
  ...
}
```

3.4.2 Les « Centres d'Activités »

Les principaux centres d'activités de ce modèle sont les deux centres du processus administratif (calcul des besoins et ordonnancement) et les trois centres du processus physique.

class Administratif : CentreActivite

```
{ char identificateur = « Centre-CA01 »;
  Organisation* processus = « Proc-Adm »;
  Agent* agent = « Agent-ACO1 »;
  Stock* stock-aval = « Stock-1 »;
  Stock* stock-amont = « Stock-2 »;
  Machine* Mach = « Mach-1 »;
}
```

class Physique : CentreActivite

```
{ char identificateur = « Centre-CA03 »;
  Organisation* processus = « Prod-Phy »;
  Agent* agent = « Agent-ACO3 »;
  Stock* stock-aval = « Stock-1 »;
  Stock* stock-amont = « Stock-2 »;
  Machine* Mach = « Mach-1 »;
}
```

De plus, nous avons défini trois autres centres : 2 générateurs de produits (A et B) et un centre d'activité marché, qui sont identiques à ceux décrits dans l'exemple précédent (cf. VI.2.4.2). Nous allons à présent détailler leur comportement (script) :

⚡ **Les Centres d'activités de transformation physique** : $CA_{3\text{à}5}^0$: Chaque centre d'activités produit ses pièces par lots, selon une quantité donnée par l'agent cognitif qui le pilote $AC_{3\text{à}5}^0$, et ne transmet les pièces qu'il a fabriqué dans le stock aval qu'une fois cette quantité terminée.

Process Transformer

```
{
  WaitForTrigger(Decision) // Attente d'une décision de l'agent cognitif  $AC_{3\text{à}5}^0$ 
  {
    CentreActivité->Etat(Active); // L'état du centre d'activité est modifiée
    Type = Decision.type(); // Récupération du type de produit à transformer
    Quant = Decision.quantite(); // Récupération de la quantité de produit à transformer
    ...
    Stock-Amont->Remove (Quant); // Enlever la quantité de produit du stock amont
    Wait (dop); // Période de transformation
    Stock-Aval->Add (Quant); // Transférer les produits dans le stock aval
    ...
    Send(Signale, ACO1); // Envoyer signal de fin d'activité
    CentreActivité->Etat(Libre); // L'état du centre d'activité passe à libre
  }
}
```

✚ **Le Centre d'activités de calcul des besoins** : CA_1^0 : L'objectif du centre d'activités CA_1^0 est de déterminer la quantité de produit à fabriquer pour chaque poste. La semaine sera la période de base de ce calcul, qui se fera à partir d'un carnet de commandes qui décrit heure par heure les commandes en produits finis pour la semaine. Il est généré à partir d'une loi aléatoire et est utilisé pour simuler le marché. L'algorithme de fonctionnement de ce centre de calcul des besoins est le suivant :

Process CalculBesoins

```
{
  WaitForTrigger(Decision)           // Attente d'une décision de l'agent cognitif  $AC_1^0$ 
  {
    ...
    int  $Q_{A,i}$  = Decision.StockA();    // Valeur du stock de sécurité prod. A par poste (i= 1 à 3)
    int  $Q_{B,i}$  = Decision.StockB();    // Valeur du stock de sécurité prod. B par poste i
    int  $E_{A,i}$  = EnCA[i];              // En cours de fabrication produit A par poste i
    int  $E_{B,i}$  = EnCB[i];              // En cours de fabrication produit B par poste i
    int  $B_A$  = CarnetDC.TotalA();       // Total des commandes de produit A
    int  $B_B$  = CarnetDC.TotalB();       // Total des commandes de produit B
    int  $Qs_{A,i}$  = StockAmt.numberIn(); // Quantité en stock de produit A par poste i
    int  $Qs_{B,i}$  = StockAmt.numberIn(); // Quantité en stock de produit B par poste i

     $P_{x,3} = B_x - Q_{x,3} - Ec_{x,3} + Qs_{x,3}$  // Quantité à produire au poste 3 (avec x = A et B)
     $P_{x,2} = P_{x,3} - Q_{x,2} - Ec_{x,2} + Qs_{x,2}$  // Quantité à produire au poste 2, produit x
     $P_{x,1} = P_{x,2} - Q_{x,1} - Ec_{x,1} + Qs_{x,1}$  // Quantité à produire au poste 1, produit x
  }
}
```

Le résultat en sortie de ce centre d'activités est constitué des quantités de pièces ($P_{x,i}$) de type A et B à fabriquer pendant la semaine sur chacun des trois postes de production.

✚ **Le Centre d'activités d'ordonnancement** CA_2^0 : L'objectif de ce centre d'activités est de calculer une liste d'O.F pour chacun des trois postes de production. L'algorithme d'ordonnancement est un algorithme de base qui consiste simplement à alterner des lots de type A et B, selon des tailles prédéfinies par l'agent qui pilote ce centre, jusqu'à épuisement des quantités à fabriquer pour la semaine. Il faut signaler que cette modélisation (sous forme de centre d'activités) permet de tester différents algorithmes d'ordonnancement sans remettre en cause la totalité du modèle de simulation.

Le flux d'entrée principal de CA_2^0 est le flux sortant du centre calcul des besoins, constitué des quantités de pièces ($P_{x,i}$) de type A et B à fabriquer pendant la semaine. Le flux principal de sortie est constitué d'une liste composée d'O.F, définis par une quantité et un type, pour les trois postes. Le réglage de ce centre est réalisé par l'agent cognitif AC_2^0 qui lui transmet les tailles de lot. Nous noterons $T_{x,i}$ la taille décidée par l'agent cognitif d'ordonnancement AC_2^0 pour les lots de pièces de type x fabriqués au poste i. L'algorithme de fonctionnement du centre d'activités CA_2^0 d'ordonnancement est le suivant :

Process Ordonnancement

```
{ WaitForTrigger(Decision)           // Attente d'une décision de l'agent cognitif  $AC_1^0$ 
  {
    ...
    j = 1;
    While ( $P_{A,i} > 0$  or  $P_{B,i} > 0$ )
      { if ( $P_{A,i} > 0$ ) // Si la quantité totale à produire de produit A pour le poste i est non nulle
        {  $Q_{i,j} = \min(P_{A,i}, T_{A,i})$ ; // Constitution d'un lot de produit A (T = taille de lot)
           $OF_i(j) = (Q_{i,j}, A)$ ; // Création d'un O.F pour le poste i (quantité et type)
          j = j + 1; // Incrémentation d'un compteur d'O.F
           $P_{A,i} = P_{A,i} - Q_{i,j}$ ; // La quantité totale de produit A est décrémenter de la quantité
        }
      if ( $P_{B,i} > 0$ ) // Si la quantité totale à produire de produit B pour le poste i est non nulle
        {  $Q_{i,j} = \min(P_{B,i}, T_{B,i})$ ;
           $OF_i(j) = (Q_{i,j}, B)$ ;
          j = j + 1;
           $P_{B,i} = P_{B,i} - Q_{i,j}$ ;
        }
      }
    ni = j - 1;
  }
  ...
}
```

3.4.3 « Les Agents Cognitifs »

Nous ne reprendrons pas à ce niveau les mécanismes d'implémentation et de fonctionnement des différents modules des agents qui sont décrits dans l'exemple 1 (cf. 2.4.3), mais nous nous intéresserons aux mécanismes de négociation et de prise de décision collective définis à partir des scénarios productiques.

Le scénario 2 autorise une certaine autonomie des agents cognitifs des deux processus opérationnels (dans la constitution et le traitement des listes d'O.F). Nous allons imaginer à partir de ce scénario deux situations de négociation et de conflits entre agents :

❶ *Négociation* : L'agent AC_1^1 qui pilote la chaîne administrative et l'agent AC_2^1 qui pilote la chaîne physique vont négocier la taille des lots de fabrication des produits. En effet, les rationalités évaluatives de ces deux agents (cf. VI.3.3.2.1) peuvent être contradictoires : le taux de service clients pour l'un nécessite une réduction des tailles de lots pour vendre un maximum de produits A et B ; le rendement physique pour l'autre implique un minimum de changements d'outils et donc des tailles de lots importantes. Ces rationalités engendrent donc une négociation entre ces deux agents pour trouver une taille de lot qui satisfasse leur rationalité évaluative.

Cette négociation, pour aboutir à une taille de lot satisfaisante, nécessite un enrichissement de la rationalité évaluative dans laquelle sera fixée un *seuil de satisfaction* (service client pour l'un et rendement physique pour l'autre) par l'agent de niveau supérieur AC_1^2 . Ce seuil sera l'objectif à atteindre par les deux agents tout au long de la négociation.

Concrètement, une première semaine de simulation avec une taille de lot initiale qui favorise le taux de service client sera entamée. L'agent cognitif AC_2^1 qui dirige le flux physique communiquera à l'agent cognitif AC_1^1 son avis sur cette taille de lot :

Classe Message

```
{
    char Numero    = « Mess-258 »;
    Agent* Ag-Exp  = « Agent-A12 »;
    Agent* Ag-Des  = « Agent-A11 »;
    char Nature    = « Requete »;
    char Type      = « urgent »,
    char Etat      = « traité »,
    char Contenu   = « Réduire taille de Lot »,
    Date          = « 09.56.00 »,
}
```

En fonction de cet avis, l'agent AC_1^1 proposera une nouvelle taille de lot, et le modèle enchaînera une nouvelle semaine de simulation. Les négociations s'arrêteront lorsque le seuil de satisfaction de l'agent AC_2^1 sera atteint, ou lorsque le seuil de satisfaction de l'agent AC_1^1 sera dépassé. Dans cet exemple on notera la volonté des agents de coopérer pour aboutir à une solution consensuelle, nous verrons au niveau de l'exploitation du modèle quelles valeurs de paramètres ont été choisies et quelles performances sont obtenues.

❷ *Conflit* : De la même manière, on peut imaginer que les seuils de satisfaction des agents soient réellement incompatibles, et qu'aucun des deux agents cognitifs AC_1^1 et AC_2^1 ne veuille remettre en cause la taille de lot en modifiant ses rationalités. Cette situation conflictuelle fait apparaître la nécessité d'une prise de décision collective (de type effet de groupe).

Nous pouvons donc la représenter par l'intégration d'un « Méta-Agent » de type « Effet de Groupe » modélisant un groupe de travail associant les deux agents AC_1^1 et AC_2^1 et l'agent AC_2^2 . Ce méta-agent noté AC_1^M aura pour connaissances l'ensemble des connaissances des agents formant le groupe, auxquelles seront associées des méta-connaissances concernant l'évolution des indicateurs (rendement et taux de service clients) en fonction de la taille de lots.

| | |
|---|----------|
| <i>Accointances</i> | |
| - AC_1^2, AC_1^1, AC_2^1 | AC_1^M |
| <i>Intentions</i> | |
| - « Résoudre conflit taille de lot » | |
| <i>Compétences</i> | |
| // Connaissances | |
| ... | |
| - Ensemble des connaissances des agents AC_1^2, AC_1^1, AC_2^1 | |
| - Règle n : Si « Taille de lot = 50 pièce » Alors « Performance globale satisfaisante » | |
| ... | |
| <i>Rationalités</i> | |
| - Re_1^2 : « Taux de service client = 4,5 jours ». | |
| - Rs_1^2 : « Possibilité de modification de la structure de décision administrative » | |
| - Re_2^2 : « Rendement physique de la chaîne de fabrication = 57 % » | |
| - Rs_2^2 : « Possibilité de modification de la structure de décision physique » | |
| <i>Décisions</i> | |
| - D_1^2, D_2^2 : « Taille de Lot = 50 » | |

L'agent AC_1^M permettra de résoudre la situation conflictuelle en modifiant les seuils de satisfaction des rationalités évaluatives Re_1^2 et Re_2^2 (par envoi de messages) pour les agents en conflits, et les rationalités de l'agent AC_1^2 qui a initié le conflit par ses directives. De plus, il fixera une taille de lot (50 pièces) satisfaisante pour les deux agents D_1^2 et D_2^2 .

L'agent AC_1^M est activé par l'agent AC_1^2 dès que ce dernier reçoit un message de AC_2^1 qui signale la présence d'un conflit (pas de négociation possible avec AC_1^1). Cette activation implique que AC_1^M a été créé a priori (de la même manière que pour les autres agents cognitifs), et que les méta-connaissances concernant l'évolution du rendement physique et des retards en fonction de la taille de lot ont été formalisées à sa création. Ces méta-connaissances sont par exemple, le résultat d'une série de simulations (cf. fig. VI.11, VI.12, VI.13).

Une autre manière d'activer l'agent AC_1^M aurait été de s'inspirer du principe de continuation dans les langages d'acteurs. En effet, l'agent AC_1^2 aurait pu créer dynamiquement une nouvelle instance de la classe *Agent* avec l'ensemble des connaissances nécessaires à la résolution du conflit. Cette méthode d'activation fait référence aux problèmes d'*Apprentissage* de manière générale, et en particulier à l'utilisation et l'exploitation des résultats de simulation pour enrichir et réorganiser les connaissances des agents.

3.5 Exploitation du Modèle

Après avoir fixé les conditions de simulation, nous présenterons le processus de négociation défini dans le paragraphe précédent (cf. VI.3.4.3), puis nous illustrerons les résultats obtenus dans les différents projets productiques (scénarios).

3.5.1 Environnement de Simulation

3.5.1.1 Conditions Expérimentales

De la même manière que pour l'exemple du « jeu des allumettes » nous avons dû poser deux

paramètres de configuration importants : la durée de la simulation et le nombre (échantillons) de simulation nécessaire. Pour déterminer ces paramètres, nous avons effectué une première expérience de simulation sur 52 semaines. Au niveau physique, nous obtenons avec le *scénario 1* des productions qui se stabilisent (régime permanent) aux environs de la troisième semaine (cf. Annexe C), nous avons donc décidé de réaliser des campagnes de 20 simulations d'une durée de 20 semaines chacune.

Les durées opératoires sont de 10/100ème d'heure pour les deux types de produit de sorte que chaque centre d'activité, travaillant 40 heures, a une capacité de 400 pièces par semaines. Les changements d'outils sont de deux heures. Au niveau physique les décisions sont prises toutes les heures, au niveau administratif le calcul des besoins est effectué 1 fois par semaine et une liste d'O.F préparée pour la semaine à venir. La loi simulant le marché (commandes par heure et par produit) est fondée une distribution normale de moyenne 3 et de variance 1.

3.5.1.2 Indicateurs de Performances

Pour présenter les résultats nous avons étudié trois indicateurs :

⇒ *un indicateur physique* qui correspond au rendement des centres d'activités physiques : $\text{Rendement} = \frac{\text{Temps de production}}{\text{Temps d' utilisation}}$, avec :

. Temps de production = (nombre de pièces produites * durée opératoire),

. Temps d'utilisation = (durées opératoires+temps changement d'outil+temps attente produits).

⇒ *un indicateur économique* qui correspond aux quantités vendues.

⇒ *un indicateur de retard moyen de livraison* : $\text{Retard} = \frac{\text{nombre d' heures de retard}}{\text{nombre de produits vendus}}$

Une « heure de retard » correspond à un produit fini demandé et en retard pendant une heure ; Après chaque heure de simulation, un processus marché vient prendre livraison d'une quantité de produits A et B, quantité liée à la loi citée plus haut, elle même modifiée ponctuellement

pour représenter une évolution du marché. Un compteur est incrémenté de la quantité non disponible, et la demande correspondante est reportée sur l'heure suivante pour permettre à l'entreprise de rattraper son retard dans la semaine. A la fin de la semaine, la demande non servie est perdue, et la valeur du compteur est divisée par la quantité totale effectivement vendue, ce qui donne un retard moyen en heures pour la semaine et correspond au *taux de service clients*.

Les performances de l'organisation vont être analysées suivant les trois scénarios :

3.5.2 « Négociation en Fonction des Tailles de Lots »

Avant de mettre en place une démarche de négociation entre les agents AC_1^1 et à AC_2^1 pour définir une taille de lot satisfaisante, une série de simulations ont permis de représenter les résultats de rendement physique et de retard de livraison en fonction de la taille des lots dans le cas du scénario 1 (liste d'O.F fourni par le processus administratif).

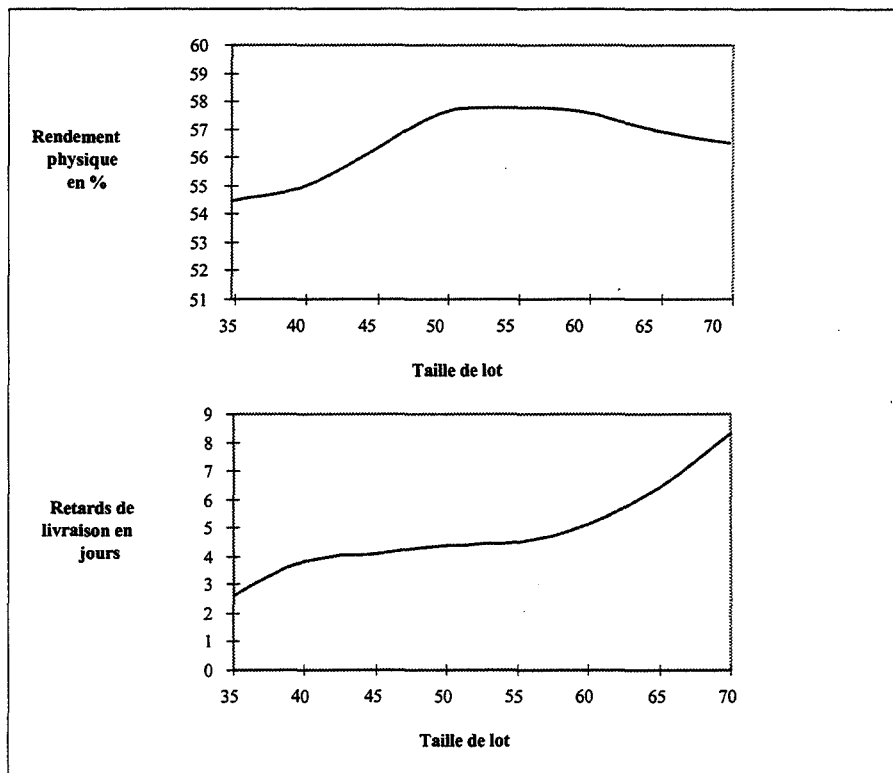


Figure VI.11 « Entreprise PMI : Performances en Fonction des Tailles de Lots »

La forme de la courbe concernant l'indicateur de rendement reflète un double phénomène : pour des lots de petite taille le temps passé en changements d'outils est important, ce qui dégrade le rendement physique, et pour des lots de grande taille les temps d'attente de lot au poste suivant deviennent élevés, ce qui dégrade également le rendement. Entre ces deux extrêmes se trouve une zone satisfaisante (taille de lot de 50).

A partir de ces données, nous allons enrichir les connaissances des agents cognitifs AC_1^1 et AC_2^1 afin de rendre possible le consensus sur une taille de lot. L'agent AC_2^1 initialise les seuils de satisfaction (rationalités évaluatives) à 4,5 jours de retard maximum pour AC_1^1 et à 57 % de rendement minimum pour l'agent AC_2^1 .

Nous lançons ensuite une simulation avec une taille de lot de 35 pièces. L'agent physique AC_2^1 ne sera pas satisfait par cette taille car le rendement est de l'ordre de 54,5%, il va donc envoyer un message à l'agent AC_1^1 , qui lui, peut se permettre (par rapport à son seuil de satisfaction) d'augmenter la taille de lot. Une nouvelle semaine de simulation débutera donc avec une nouvelle taille de lot (incrémentation par pas de 5). Ce processus se poursuivra jusqu'à ce que l'organisation simulée converge vers une taille satisfaisante (environ 50 pièces) :

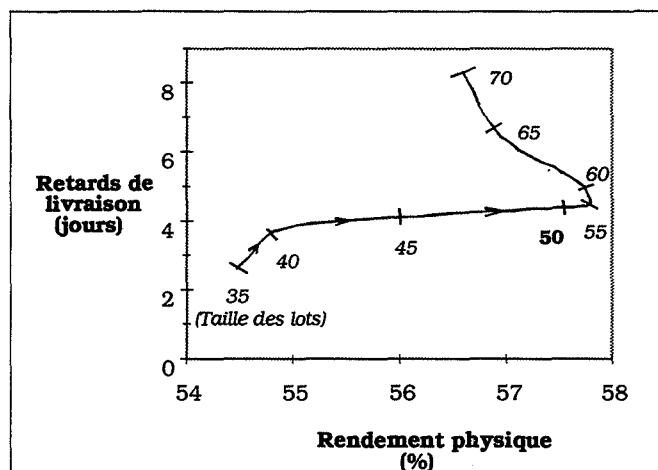


Figure VI.12 « Entreprise PMI : Evolution de la taille de lot »

Cette taille de lot de 50 pièces sera donc conservée dans les simulations suivantes concernant les différents scénarios productiques.

3.5.3 Scénario 1 : « Flux Poussé »

Dans ce premier scénario, nous tentons de reproduire le modèle le fonctionnement de l'entreprise *PMI* tel qu'il était avant les changements organisationnels. Une variante a été étudiée pour ce scénario, elle consiste à perturber un peu plus le marché, par la modification de la variance (qui passe de 1 à 2), ce qui permet de représenter un environnement instable. Les performances qui résultent de ces caractéristiques sont :

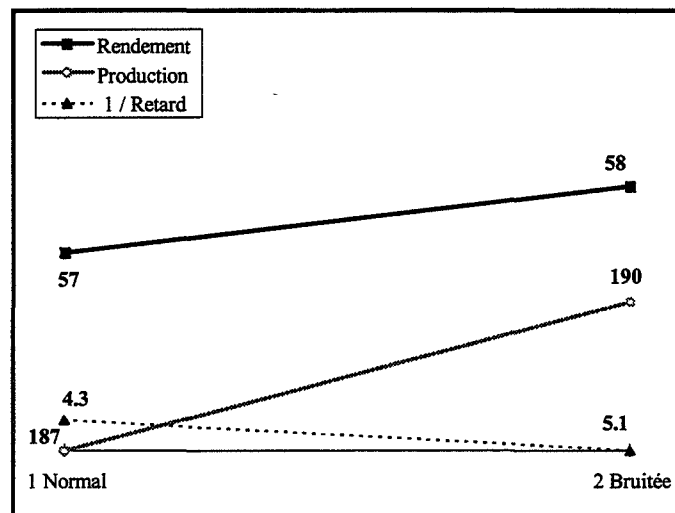


Figure VI.13 « Entreprise *PMI* : Performances Scénario 1 : Flux Poussé »

Dans la configuration de marché stable, la production vendue est de 187 pièces par semaine, les retards de livraison de l'ordre 4,3 heures, et le rendement moyen des centres est de 57 %, ce qui signifie que près de la moitié du temps d'ouverture est passée en changements d'outils et en attentes de pièces.

3.5.4 Scénario 2 : « Autonomie »

Nous allons maintenant passer à une situation dans laquelle les agents ont une certaine autonomie décisionnelle. Ce scénario est équivalent (en terme de gestion de type MRP) au scénario 1, la différence se situe dans la possibilité pour les agents de réorganiser les O.F. Deux possibilités vont être étudiées en fonction des connaissances et des intentions des agents.

① « Autonomie au Niveau Opérationnel »

Une première variante dans ce scénario est de représenter la volonté de l'agent cognitif qui pilote la chaîne d'activités physique AC_2^1 d'améliorer le rendement physique. Aussi, à partir de la connaissance (cf. VI.3.3.2.3) selon laquelle une diminution du nombre de changements d'outil améliore le rendement, cet agent va réorganiser les O.F qu'il reçoit de la chaîne administrative, en regroupant tous les O.F des produits de type A, puis tous les O.F des produits de type B. Il transmet alors cette liste aux agents cognitifs qui pilotent les centres d'activités, ce qui entraîne les performances suivantes :

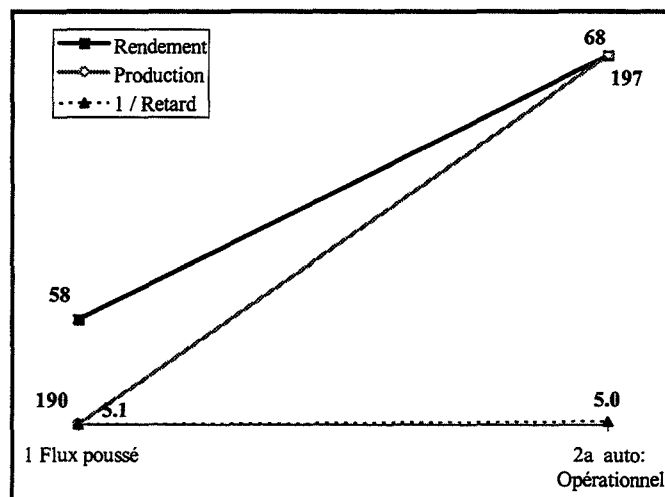


Figure VI.14 « Entreprise PMI : Performances Scénario 2 : Autonomie Opérationnelle »

Il y a une amélioration du rendement physique qui passe de 58 % (scénario 1 bruité) à 68 %, mais en contre partie, le retard moyen de livraison stagne aux environs à près de 5 heures. Ce résultat ne convient naturellement pas à l'agent cognitif qui pilote la chaîne administrative AC_1^1 qui lui est jugé selon le taux de service client (indicateur de retard). Ce scénario constitue donc un cadre idéal pour représenter les négociations entre agents.

② « Autonomie au Niveau Physique »

Une deuxième variante dans ce scénario consiste à évoluer vers davantage d'autonomie des agents de la chaîne d'activités $AC_{3,5}^0$, de sorte qu'ils puissent réorganiser eux-mêmes les listes

d'O.F générées par la chaîne d'activités administrative. Cela signifie que les rationalités structurelles de niveau supérieur vont permettre aux agents d'appliquer les règles 3 et 4 (cf. 3.3.2.3) qui leur permet de choisir le premier O.F effectivement réalisable en fonction des stocks amont de pièces A et B, ce qui permet de réduire les temps d'attente de lots et taux d'occupation des postes :

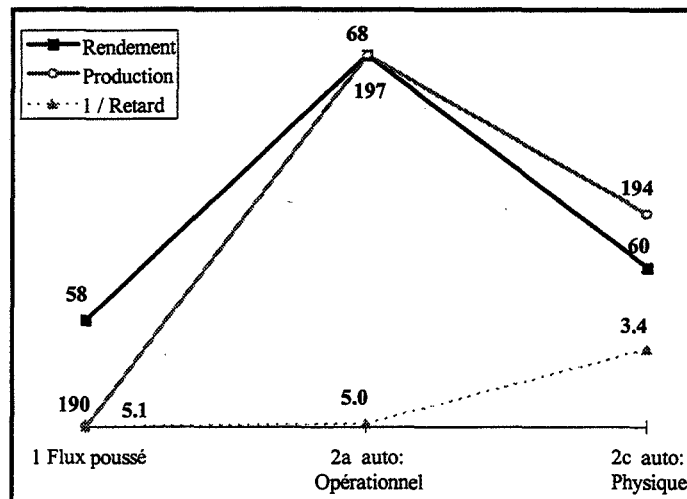


Figure VI.15 « Entreprise PMI : Performances Scénario 2 : Autonomie Physique »

Nous observons une amélioration de l'indicateur de retard puisque le retard moyen passe de plus de 5 heures (dernier scénario) à 3,4 heures.

3.5.5 Scénario 3 : « Flux Tiré »

Le troisième scénario proposé pour le modèle représente l'évolution vers un système de production en flux tiré. Pour cela, l'agent cognitif AC_1^2 qui oriente le processus stratégique va supprimer le processus opérationnel administratif et confier au processus physique le soin de gérer les décisions de production à l'aide d'un système kanban (cf. Annexe A). Il y a donc une évolution forte avec un rapprochement entre structure décisionnelle et système physique.

Nous mettons en circulation pour chaque poste et pour chaque type de pièces A et B cinq étiquettes correspondant chacune à 10 pièces. La production est autorisée lorsque 3 étiquettes sont revenues sur le tableau kanban (cf. Annexe A). La taille des lots variera donc entre 30

pièces (3 étiquettes) et 50 pièces (5 étiquettes). Chaque quantité de produit correspondant à un lot sera transmise immédiatement au poste aval, sans attendre que la totalité du lot soit terminée.

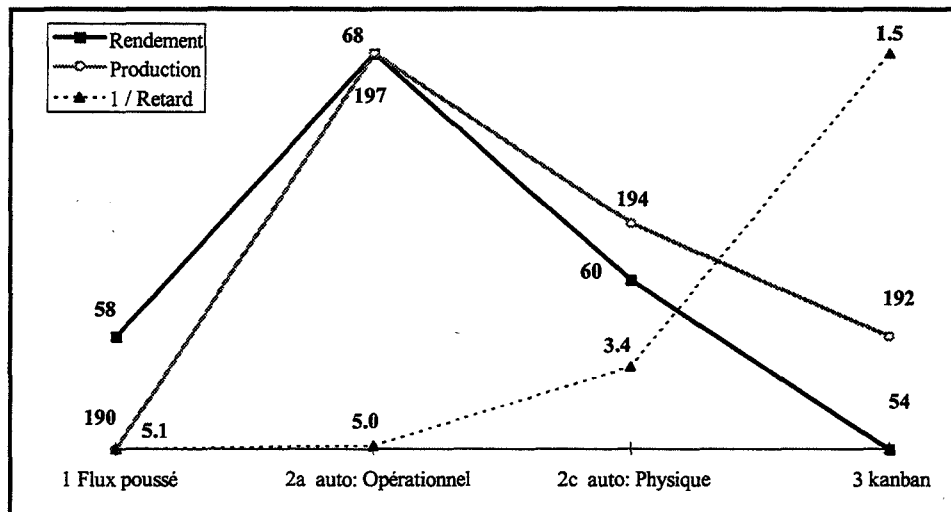


Figure VI.16 « Entreprise PMI : Performances Scénario 3 : Flux Tiré »

Il y a une amélioration considérable de l'indicateur de retard, qui passe de 3,4 à 1,5 heures de retard moyen, tandis que la production diminue légèrement et que le rendement décroît en raison du nombre plus élevé de changements d'outil. La mise en place d'un système de type kanban qui alimente une prise de décision décentralisée a donc permis d'atteindre un meilleur état de performance globale de l'entreprise.

3.6 Conclusion

La mise en oeuvre de notre démarche sur un exemple d'entreprise industrielle a permis de montrer que la méthodologie proposée est adaptée à la représentation de cas réels de projets stratégiques d'organisations confrontées à l'évolution de leur environnement.

Après une validation des techniques de simulation sur le premier exemple le « jeu des allumettes », nous avons validé sur ce modèle d'entreprise la capacité des agents à communiquer et à négocier pour améliorer leur efficacité par rapport aux objectifs et aux rationalités qui leur ont été définis.

Cette validation se situe à deux points de vue différents :

- un point de vue implémentatoire dans lequel les concepts d'objets actifs ont permis de représenter et de formaliser les interactions entre agents et entre centres d'activités (au sens de la simulation).
- un point de vue productique duquel émerge l'intérêt de l'intégration des concepts d'intelligence artificielle distribuée dans les modèles de simulation. En effet, la représentation d'une plus grande autonomie des acteurs décisionnels, et de la possibilité pour eux d'agir avec une certaine latitude décisionnelle a permis d'étudier les évolutions en terme de performance de l'organisation.

Mais, le concept principal qui ressort de l'étude de ces deux exemples est la possibilité de modifier les modes de gestion de production du système physique sans changer la structure du modèle, ce qui a été rendu possible par l'intégration des agents cognitifs au modèle de simulation.

Une synthèse des points forts et des insuffisances de la méthodologie, observés suite à la mise en oeuvre du modèle sur les deux exemples d'application est présentée au niveau de la conclusion générale.

CONCLUSION GENERALE

SYNTHESE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION

Le processus de modélisation développé dans cette thèse, et qui en constitue la finalité principale, a pour but de concevoir des modèles de simulation d'organisations productives intégrant une représentation des comportements distribués et cognitifs des acteurs décisionnels. De tels modèles permettront d'évaluer la pertinence de changements organisationnels face à la réalité du contexte industriel de l'entreprise.

Deux grandes hypothèses ont servi de base aux travaux menés dans cette thèse, elles considèrent :

- Que la simulation est un moyen efficace pour appréhender la complexité des organisations productives et valider l'intérêt des changements organisationnels au sein de ces systèmes,
- Qu'une plus grande autonomie des acteurs décisionnels permet de faire évoluer les organisations de manière à ce qu'elles puissent répondre efficacement à un environnement incertain et instable.

Ces deux hypothèses ont été approfondies tout au long d'une démarche méthodologique qui a débuté dans le chapitre I par une présentation des organisations productives en tant que systèmes complexes, et de la nécessité pour elles de développer les deux axes privilégiés que sont la flexibilité et l'intégration. Ce chapitre a également fait apparaître l'importance des comportements cognitifs dans les processus de prises de décisions liés aux stratégies et aux interactions des acteurs.

A partir de cette présentation, le chapitre II a permis d'entamer le processus de modélisation par la construction d'un modèle de compréhension appelé « *Méta²* » basé sur une nouvelle approche de gestion (la gestion par les activités), sur une vision systémique (AMS) et sur les concepts de rationalités (formalisation des phénomènes d'orientation des prises de décisions).

Ce modèle favorise la représentation explicite d'une structure décisionnelle proche de la structure physique, et intègre des notions de méta-système pour évoluer d'un modèle de prises de décisions hiérarchique à un modèle de décision en niveaux d'intégration.

Le chapitre III a posé les bases de l'un des fondements théoriques utilisés dans cette thèse, les systèmes multi-agents, et montré l'adéquation de ces systèmes à la modélisation des phénomènes décisionnels dans les organisations industrielles. En particulier, l'étude des systèmes multi-agents fait apparaître des concepts importants liés aux sociétés d'agents, tels que : la négociation, la coopération, les conflits, l'apprentissage, l'émergence, etc.

Le chapitre IV, quant à lui, a permis d'évoluer dans la démarche en passant du modèle conceptuel de compréhension *Méta²* à un modèle de représentation informatique des organisations à base d'agents, selon deux axes de développements :

- l'étude de sociétés d'agents cognitifs d'une part en terme d'organisation sociale, et d'autre part à travers les comportements liés aux interactions entre agents (raisonnements, communication, négociation, intentions, ...),
- la formalisation des différents modules et composants d'une organisation productive.

Dans le chapitre V, nous avons tout d'abord étudié le meilleur moyen d'implémenter cette société d'agents (blackboard, acteurs, objets actifs) en tenant compte des contraintes liées aux techniques de simulation à événements discrets. Pour cela, nous avons opté pour une solution basée sur un environnement de programmation à objets concurrents (proche des acteurs), ce qui rejoint de nombreux travaux effectués dans le domaine concernant le développement de plates-formes génériques de systèmes multi-agents. Nous avons par la suite décrit les différentes étapes de la construction de ce modèle de simulation à base d'objets actifs dédié à la

simulation d'agents pour la productique.

Le dernier chapitre (chapitre VI) concerne la mise en oeuvre de cette démarche méthodologique sur des applications industrielles ; ce qui a permis de valider notre approche selon trois dimensions :

- Une première concernant la **validité des modèles**, aussi bien en terme de techniques de simulation orientée objets, par la mise en oeuvre sur un exemple pédagogique : le « Jeu des Allumettes », qu'en terme d'adéquation des différents modèles à la complexité de cas réels d'entreprises. En effet, si le premier exemple, relativement simple, a permis de valider le bon fonctionnement de notre modèle de simulation (réactions aux aléas, synchronisation des processus, ...), le second quant à lui plus proche de la réalité des entreprises d'aujourd'hui a permis de tester et de vérifier que les concepts et modèles définis étaient cohérents avec une réalité complexe.

- Une seconde liée à la **réutilisabilité des modèles** : le passage du premier exemple au second nous a permis de tester la réutilisabilité du modèle de simulation en terme de composants logiciels. En effet, la construction du modèle de l'entreprise *PMI* est issue des mêmes modules de base (agents, centres d'activités, entités de transaction, ...) enrichis (ajout de méthodes, de traitements, ...).

Un autre point important concernant la flexibilité du modèle de simulation est évidemment la possibilité de modifier les structures organisationnelles en se basant sur les connaissances des agents qui orientent ces structures, et sur les propriétés intrinsèques des techniques *objets* (héritage, encapsulation, ...).

- La troisième validation se situe au niveau des **concepts théoriques productiques**, en effet, l'hypothèse concernant la nécessité de changements organisationnels dans les entreprises et l'évolution vers plus d'autonomie des acteurs décisionnels, a trouvé un début de réponse dans ce chapitre par comparaison de différents scénarios productiques et analyse des performances obtenues.

L'originalité principale de ce travail réside donc dans l'intégration de techniques d'IAD-SMA à l'étude comportementale des organisations productives, et la conception d'un modèle de simulation incluant des capacités de perception, de raisonnement, de communication et d'organisation. Cette dimension cognitive permet à ce modèle d'être plus proche de la réalité des entreprises et donc de reproduire une image fidèle et réaliste des évolutions ou des comportements de ces systèmes complexes.

PERSPECTIVES

Le processus de modélisation proposé appelle cependant des approfondissements, à la fois sur le plan conceptuel et sur celui des techniques d'implémentation. Des enrichissements possibles liés à la modélisation et à l'implémentation de la société d'agents sont envisageables.

Comme nous l'avons montré dans les chapitres V et VI, la démarche et les modèles développés sont opérationnels ; néanmoins dans une perspective de type atelier de génie productique, il semble intéressant et réalisable de construire une interface concepteur conviviale s'appuyant sur les concepts de *Méta*².

Une autre évolution relativement immédiate concerne l'aspect temporel des raisonnements des agents cognitifs. Il serait intéressant d'ajouter une notion d'intervalle de raisonnement qui correspondrait à une durée moyenne de réflexion du processus de prise de décisions.

Un point important, qui fait actuellement l'objet de travaux de recherches dans notre laboratoire, concerne l'enrichissement (aussi bien en terme d'acquisition que de représentation) des connaissances des agents. En effet, une étude approfondie des différents types de connaissances (stratégiques, opérationnelles,...) et des décisions (réflexes, structurées,...) liés à la gestion de production est nécessaire (cf. chapitre II) pour modéliser de manière précise les comportements décisionnels. La structure d'agents que nous avons proposée semble relativement générique (en terme de structure), et les outils d'implémentation utilisés suffisamment ouverts, pour que l'on puisse imaginer des enrichissements qui ne remettent pas en cause l'architecture présentée : redéfinition de la connaissance dans le *module cognitif* ou

dans le *module de raisonnement*, mise en place d'une *unité de contrôle* basée sur de la connaissance, couplage du modèle de simulation avec des mécanismes d'inférences efficaces, spécification de la *perception* afin de tenir compte des dysfonctionnements liés au système d'information, etc.

Enfin, la simulation constitue une démarche expérimentale que l'on peut exploiter pour le développement de processus d'apprentissage et pourrait permettre une mise à jour et une réorganisation des connaissances. Dans cette optique, le modèle de simulation que nous proposons présente une architecture appropriée à la mise en place de mécanismes d'apprentissage décisionnel au sein des agents cognitifs. Des travaux de recherche dans ce sens sont également en cours de développement.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [Adama, 84] ADAMA, F.B. *Contribution à un Analyseur Informatique GRAI*. Thèse Doct. : Université de Bordeaux I, 1984. 149 p.
- [Agha, 86] AGHA, G. *Actor's : A Model of Concurrent Computation in Distributed Systems*. Cambridge (MA) : MIT Press, 1986. 144 p.
- [Agha, 88] AGHA, G. *Concurrent Programming using Actors*. In Proceedings of the ACM SIGPLAN Workshop on Object-Based Concurrent Programming, San Diego, Sept. 26-27, 1988. 214 p.
- [Agha, 93] AGHA, G. *Research Directions in Concurrent Object-Oriented Programming*. Cambridge (MA) : MIT Press, 1993. 532 p.
- [Akerbaek, 93] AKERBAEK, T. *C++, Coroutine, and Simulation*. The C User Journal, 1993, N° 3. p. 74-86.
- [Allen, 84] ALLEN, F.J. *Towards a General Theory of Action and Time*. Artificial Intelligence, 1984, Vol. 23. p. 123-154.
- [Amice, 89] AMICE CIMOSA *Open System Architecture for CIM*. Berlin : Springer_Verlag, 1989. 212 p.
- [Anderson, 95] ANDERSON, J. et EVANS, M. *A Generic Simulation System for Intelligent Agent Designs*. Artificial Intelligence, 1995, Vol. 3, N° 5. p. 525-560.
- [Ansoff, 89] ANSOFF, H. *Stratégie du développement de l'entreprise*. Paris : Editions d'organisation, 1989. 287 p.
- [Antony, 76] ANTONY, R. et DEARDEN, J. *Management control system - Text and cases*. Homewood (Illinois) : R. Irwin inc., 1976. 771 p.
- [Ayel, 91] AYEL, J. *CIMES, Un Système d'Intelligence Artificielle Distribuée pour la Supervision en Continu des Activités de Gestion de Production*. Thèse Doct. : Université de Savoie, 1991. 228 p.
- [Balci, 90] BALCI, O. *Guidings for Successful Simulation Studies*. In the Proceeding of the 1990 Simulation Conference, New Orleans, Louisiana, december 9-12, 1990. p. 25-32.
- [Barakat, 91] BARAKAT, O. *Contribution à la Modélisation et à la Simulation Orientées-Objets des Systèmes Flexibles de Production*. Thèse Doct. : Université de Franche-Comté, 1991. 156 p.
- [Baranger, 87] BARANGER, P. *Gestion de la production*. Paris : Vuibert, 1987. 318 p.

[Barbier, 89] BARBIER, F. *Une Approche Objet Dédiee à la Fonction Production d'une Entreprise Manufacturière: Application à la Gestion de Production*. Thèse Doct. : Université de Savoie, 1989. 208 p.

[Bel, 88] BEL, G. *Ordonnancement et Intelligence Artificielle*. Colloque International Productique et Robotique: les Apports de l'Intelligence Artificielle, Bordeaux, France, mars 15-17, 1988. p. 4-11.

[Bel et al. 90] BEL, G. et CAVAILLE, J.B. *Intégration de la Simulation dans la Conception de Systèmes de Production: Avantages et Dangers de l'Approche par Langages à Objet*. Colloque International sur Productique & Intégration, Bordeaux, France, juin 12-14 1990. p. 597-603.

[Belanger, 90] BELANGER, R. *MODSIM II - A Modular, Object-Oriented Language*. Winter Simulation Conference Proceedings, New Orleans, USA, decembre 9-12. 1990. p. 118-122.

[Beranger, 87] BERANGER, P. *Les nouvelles règles de la production - Vers l'excellence industrielle*. Paris : Dunod, 1987. 224 p.

[von Bertalanffy, 76] von BERTALANFFY, L. *Théorie générale des systèmes*. Paris : Dunod, 1976. 296 p.

[Bezivin, 87] BEZIVIN, J. *Some Experiments in Object-Oriented Simulation*. Proceedings of OOPSLA'87, Paris, 1987. p. 158-172.

[Bond et Gasser, 88] BOND, A.H. et GASSER, L. *Readings in Artificial Intelligence*. San Mateo (CA) : Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1988. 649 p.

[Borland, 93] BORLAND. *ObjectWindows pour C++ : Guide de l'Utilisateur*. Velizy Villacoublay : Borland International, Inc., 1993. 449 p.

[Boulanger, 94] BOULANGER, D., COLLOC, J., DUBOIS, G. et WINTERGERST, C. *Objets-Agents : Continuum ou Différences ?*. Programme de Recherche Coordonnées - Groupement de Recherche du CNRS, LAFORIA, Paris, decembre 1994. Pagination Multiple.

[Bouron, 93] BOURON, T. *Structures de Communication et d'Organisation pour la Coopération dans un Univers Multi-Agents*. Thèse Doct. : Université PARIS 6, 1993. 240 p.

[Braesch, 89] BRAESCH, C. *Approche de Modélisation du Système de Production d'une Entreprise Manufacturière*. Thèse Doct. : Université de Franche-Comté, 1989. 202 p.

[Brehmer, 91] BREHMER, B. *Organization for Decision Making in complex Systems*. In Distributed Decision Making : Cognitive Models for cooperative Work. J. Rasmussen, B. Brehmer and J. Leplat, Eds. New York : John Wiley & Sons Ltd. 1991. 397 p.

[Briot, 89] BRIOT, J.P. *Actalk : a testbed for classifying and designing Actor languages in the Smalltalk-80 Environment*. ECOOP'89, Oslo, Norway, August, 15-17. 1989. p. 125-137.

-
- [Burlat et al., 95] BURLAT, P., OUZROUT, Y., VINCENT, L. *A Meta-Systemic Model for the Reactive Firm*. ETFA' 95 Conference, Paris, October 10-13. 1995, Vol. I. p. 691-700.
- [Burlat, 96] BURLAT, P. *Contribution à l'évaluation économique des organisations productives : vers une modélisation de l'entreprise compétences*. Thèse Doct. : Université Lumière LYON 2, 1996. 385 p.
- [Bussman, 94] BUSSMAN, S. et DEMAZEAU, Y. *An Agent Model combining reactive and cognitive capabilities*. In IEEE International Conference on Intelligent Robots and systems, IROS'94, Munchen, September, 1994, Vol. I. 738 p.
- [Camarata, 83] CAMARATA, S., McARTHUR, D. et STEEB, R. *Strategies of cooperation in distributed problem solving*. In Proceedings of IJCAI-83, Karlsruhe, 1983, Vol. 1. 615 p.
- [Cardozo, 93] CARDOZO, E. et SICHMAN, J.S. et DEMAZEAU, Y. *Using the Active Object Model to Implement Multi-Agent Systems*. Proceedings of the 5th IEEE Int. Conf. On Tools with Artificial intelligence, 1993, Boston, USA. p.70-77.
- [Carle, 92] CARLE, P. *Mering IV : un Langage d'Acteurs pour l'Intelligence Artificielle Distribuée intégrant Objets et Agents par Reflexivité Compilatoire*. Thèse Doct. : Université Paris 6, 1992. 280 p.
- [Caromel, 93] CAROMEL, D. *Toward a Method of Object-Oriented Concurrent Programming*. Commun. ACM, 1993, Vol. 36, N° 9. p. 90-102.
- [Cavaille et al. 87] CAVAILLE, J.B. et PROTH, J.M. *SIPRODIS: Pratique de la Simulation en Production Discontinue*. Nanterre : Colloques & Conseils, 1987. 333 p.
- [CETIM, 92] CETIM. *Logiciels de Simulation Disponibles en Europe*. Rapport d'étude 3C39, Senlis(Fr) : CETIM, 1992. Pagination multiple.
- [Chiloup-bekaapt, 91] CHILOUP-BEKAAPT, M.H. *Utilisation de la Notion d'Objets avec Contraintes pour la Modélisation et la Simulation des Systèmes de Production*. Thèse Doct. : Université de Lille Flandres Artois, 1991. 154 p.
- [Cohendet et Llerena. 90] COHENDET, P. et LLERENA, P. *Flexibilité et évaluation des systèmes de production*. In Gestion Industrielle et Mesure Economique, Paris : Ecosip Economica, 1990. 425 p.
- [Cyert, 70] CYERT R. et MARCH J. *Processus de décision dans l'entreprise*. Paris : Dunod, 1970. 341 p.
- [Dahl, 66] DAHL, O.J. et NYGAARD, K. *SIMULA, An Algol-Based Simulation Language*. Commun. ACM, September, 1966, Vol. 9, N° 9. p. 671-678.
- [Davis et Smith, 83] DAVIS, R. et SMITH, R.G. *Negotiations as a metaphor for distributed problem solving*. Artificial Intelligence, 1983, Vol. 1. p. 63-109.

-
- [Decker, 87] DECKER, K.S. *Distributed problem-solving techniques: a survey*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1987, Vol. smc-17. p. 729-740.
- [Demazeau et Müller, 90] DEMAZEAU, Y., et MULLER, J.P. *Decentralized artificial intelligence*. Proceeding of the 1st modelling autonomous agents and multi-agents worlds, Cambridge, 16-17, August, 1989. Amsterdam: North-Holland, 1990. 263 p.
- [Dojat, 94] DOJAT, M. *Contribution à la Representation d'Expertises Médicales Dynamiques : Application en Réanimation Médicale*. Thèse Doct. : Université de Technologie de Compiègne, 1994. 240 p.
- [Doumeingts, 90] DOUMEINGTS, G. : *La méthode GRAI*. Université de Bordeaux, Cours polycopié. 1990. Pagination multiple.
- [Doumeingts et al. 91] DOUMEINGTS, G. et VALLESPER, B. *Techniques de Modélisation pour la Productique*. In Proceedings of the 23rd CIRP International Seminar on Manufacturing systems, juin 6-7, 1991, Tome I, Nancy, France. 10 p.
- [Duffau et al. 84] DUFFAU, B. et BLOCHE, E. *La Simulation des Unités de Production*. Intelligence Artificielle et Productique, 1984, Vol. 1, N° 1. p. 19-24.
- [Durfee, 88] DURFEE, E.H. *Coordination of distributed problem solvers*. Boston : Kluwer Academic Publishers, 1988. 288 p.
- [Durfee et al. 89] DURFEE, E.H., LESSER, V.R. et CORKILL, D.D. *Increasing Coherence in Distributed Problem Solving Network*. In Barr, Cohen and Feigenbaum Eds. The Handbook of Artificial Intelligence, New York : Addison-Wesley, 1989, Vol. IV. p. 85-147.
- [Durieux, 92] DURIEUX, C. *Gestion de la Production et Dynamique Organisationnelle de l'Entreprise*. Grenoble (Fr) : IRPED Service des publications, mars, 1992. 501 p.
- [Erceau et Ferber, 91] ERCEAU, J. et FERBER, J. *L'intelligence artificielle distribuée*. La Recherche, 1991, Vol. 22, N° 233. p. 750-758.
- [Erman et al. 80] ERMAN, D.L., HAYES-ROTH, F., LESSER, V.R., et REDDY, R.D. *The Hearsy-II speech understanding system*. ACM Computing Surveys, 1980, Vol. 12, N° 2. p.213-256.
- [Everaere et Mahieu. 91] EVERAERE, C. et MAHIEU, C. *Systèmes Intégrés de Production*. In Revue Economie et Sociétés, série science et gestion, avril, 1991, n°17. p. 57-79
- [Ferber et Ghallab, 88] FERBER, J. et GHALLAB, M. *Problématiques des Univers Multi-Agents Intelligents*. Acte des 2ème Journées du PRC GRECO Intelligence Artificielle, Toulouse, France, 1988. Toulouse : TEKNEA, 1988. p. 295-320.
- [Ferber, 89] FERBER, J. *Objets et Agents : une étude des structures de représentation et de communication en intelligence artificielle*. Thèse d'état : Université Paris VI. 1989. 492 p.

-
- [Ferber, 93] FERBER, J. *Communication et Protocoles dans les SMA*. Support de cours, MIRIAD, Paris : Institut Blaise Pascal, 1993. Pagination multiple.
- [Ferber, 94] FERBER, J. *La Kénétique : des systèmes multi-agents à une science de l'interaction*. In *Revue internationale de systémique*, 1994, Vol. 8, N° 1. p. 13-27.
- [Ferretti, 92] FERRETTI, M. *L'Intelligence Artificielle dans l'Industrie*. *Journal Robotique Informatique Industrielle*, 1992, N° 84, p. 38-47.
- [Finin et al. 94] FININ, T., FRITZON, R., MCKAY, D. et al. *KQML as an Agent Communication Language*. In the *Proceedings of the Third International Conference of Information and Knowledge Management, CIKM'94*, November, 1994. p. 52-60.
- [Fox, 81] FOX, M.S. *An Organizational View of Distributed Systems*. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1981, Vol. SMC-11, N° 1. 1140 p.
- [Gaches et al. 93] GACHES, R., QUERENET, B. et VERNADAT, F. *CIMOSA: une Architecture pour l'Intégration dans les Entreprises Manufacturières*. Acte de Université d'Eté du Pole Productique Rhône-Alpes, Aussois, France, septembre 13-17, 1993. 15 p.
- [Garvey et al. 86] GARVEY, A., HEWETT, M., JOHNSON, V. *BB1 User Manual - Common Lisp Version*. Knowledge Systems Laboratory. Stanford Univ., Stanford (CA), 1986. 156 p.
- [Gasser et al. 87] GASSER, L.G., BRAGANZA, C., et HERMAN, N. *MACE : A flexible testbed for distributed AI research..* In *Distributed Artificial Intelligence*. Morgan Kaufmann Eds, San Mateo (CA) : Pitman, Vol. 1, 1987. p. 119-153.
- [Gasser, 91] GASSER, L.G. *Social Conceptions of Knowledge and Action*. *Artificial Intelligence*, december, 1991. p. 107-138.
- [Gasser et al. 92] GASSER, L.G. et AVOURIS, N.M. *Distributed Artificial Intelligence : Theory and Practice*. Boston : Kluwer Academic, 1992. 235 p.
- [Genelot, 92] GENELOT, D. *Manager dans la complexité*. Paris : INSEP Editions, 1992. 328 p.
- [Ghallab et Mounir, 89] GHALLAB, M., et MOUNIR, A. *Managing efficiently temporal relations Through Indexed spanning Trees*. In *Proceedings IJCAI-89*, Detroit (MI), August 20-25, 1989. p. 1297-1303.
- [Ghedira, 92] GHEDIRA, K, et VERFAILLIE, G. *A multi-agent model for the resources allocation problem*. In *10th European Conference on Artificial Intelligence*, Vienne, Autriche, 7-8 Aout. 1992. p. 252-256.
- [Giard, 88] GIARD, V. *Gestion de la production*. Paris : Economica, 1988. 1068 p.
- [Gibert, 89] GIBERT, M. *L'intégration des systèmes de production*. Lyon : PUL, 1989. 251 p.

-
- [Goldberg et al. 83] GOLDBERG, A. et ROBSON, D. *Smalltalk-80: the Language and its Implementation*. Reading (MA) : Addison-Wesley, 1983. 715 p.
- [Goldratt et al. 86] GOLDRATT, E.M. et COX, J. *Le But: L'Excellence en Production*. Paris : Afnor Gestion, 1986. 269 p.
- [Gorry et al. 71] GORRY, G. et SCOTT-MORTON M. *A framework for management information systems*. Sloan management review, Cambrige (MA), 1971, Vol. 13. p. 55-70.
- [Guessoum, 94] GUESSOUM, Z. *Systèmes Asynchrones de Production*. Acte des 2ème Journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents, Grenoble, France, 1994, p. 197-207.
- [Hayes-Roth, 85] HAYES-ROTH, B. *A blackboard architecture for control*. Artificial Intelligence Journal, 1983, N° 26. p. 251-321.
- [Hewitt, 77] HEWITT, C. *Viewing control structures as patterns of messages passing*. Artificial Intelligence, 1977, N° 8. p. 323-364.
- [Hewitt et Liebermann, 84] HEWITT, C. et LIEBERMANN, H. *Design issues in parallel architectures for artificial intelligence*. In Proceedings 28th IEEE conference Computer Society. San Fransisco, 1984. p. 418-423.
- [Hewitt, 91] HEWITT, C. *Open information systems semantics for distributed artificial intelligence*. Artificial Intelligence, 1991, Vol. 47. p. 79-106.
- [Hill, 93] HILL, D.R.C. *Analyse Orientée Objets & Modélisation par Simulation*. Paris : Addison-Wesley, 1993. 362 p.
- [Hollinger, 87] HOLLINGER, D. *Les Langages Orientés-Objets en Spécification et Simulation des Systèmes Productiques*. Journées SIPRODIS : Pratique de la Simulation en Production Discontinue, Paris, juin 2-3, 1987. p. 79-91.
- [Iffenecker, 92] IFFENECKER, C. *Un Système Multi-Agents pour le Support des Activités de Conception de Produits*. Thèse Doct. : Université PARIS VI, 1992. 145 p.
- [Jullien, 91] JULLIEN, B. *Simulation des Systèmes de Production*. Support de Cours, Ecole Nationale Supérieure des Mines de St-Etienne, France, 1991. 172 p.
- [Kellert, 92] KELLERT, P. *Définition et Mise en Oeuvre d'une Méthodologie Orientée Objets pour la Modélisation des Systèmes de Production*. Congrès Inforsid'92, Clermont-Ferrand, France, mai 19-22, 1992. p. 415-436.
- [Kieffer, 86] KIEFFER, J.P. *Les Systèmes de Production, leur Conception et leur Exploitation : Situation actuelle et Propositions pour une recherche appliquée en Génie industriel*. Thèse d'état : Université Aix-Marseille, 1986. 336 p.

[Kieffer et Gousty, 88] KIEFFER, J.P., et GOUSTY, Y. *Une nouvelle typologie pour les systèmes industriels de production*. Revue Française de Gestion, Juin-Juillet-Aout, 1988, N° 69. p. 104-111.

[Kieffer et Thiel, 92] KIEFFER, J.P., et THIEL, D. *Industrial dynamics and simulation of production systems*. In Proceedings of the 8th International Conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future, Metz, France, August 17-19 1992, Vol. 1. 928 p.

[Kouiss et al, 95] KOUISS, K., PIERREVAL, H. et MEBARKI, N. *Towards the use of Multi-Agents Approach to the Dynamic Scheduling of Flexible Manufacturing Systems*. In Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Production Management, Marrakech, Morocco, April 4-7, 1995, pp. 118-126.

[Lâasri et al, 88] LAASRI, H., MAITRE, B., et HATON, J.P. *Organisation, Coopération et exploitation des connaissances dans les architectures de blackboard : ATOME*. In. Actes des 8èmes Journées Internationales sur les Systèmes Experts et leurs Applications, Avignon, juin 88, Tome 3, p. 371-390.

[Lâasri et Maitre, 89] LAASRI, H., et MAITRE, B. *Organisation du contrôle dans les architectures de blackboard*. Revue d'Intelligence Artificielle, 1989, Vol. 3. p. 105-146.

[Lebel, 77] LEBEL J. *La dynamique des systèmes, analyse et synthèse*. In Modélisation et maîtrise des systèmes techniques économiques sociaux, Actes du congrès de l'Afcet, Suresnes (Fr) : Editions Hommes et Techniques, 1977, Tome 1. p. 235-246.

[Lemoigne, 84] LE MOIGNE J. L. *La théorie du système général (théorie de la modélisation)*. Deuxième édition, Paris : PUF, 1984. 338 p.

[Lemoigne, 90] LE MOIGNE, J.L. *La Modélisation des Systèmes Complexes*. Paris : Editions Dunod, 1990. 178 p.

[Lenat, 75] LENAT, D.B. *Beings : Knowledge as interacting experts*. In Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence, Cambridge (MA), 1975. p126-133.

[LePage, 93] LE PAGE, P. *Analyse des Relations Clients-Fournisseurs par une Approche Multi-Agent*. Thèse Doct. : Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, 1993. 211 p.

[Leroudier, 80] LEROUDIER, J. *La Simulation à Evénements Discrets*. Paris : Hommes et Techniques, 1980. 101 p.

[Lespérance, 95] LESPERANCE, Y., LEVESQUE, H.J. et LIN, F. *Fondements d'une Approche Logique à la Programmation d'Agents*. In 3ème Journées Francophones sur l'Intelligence Artificielle Distribuée & les Systèmes Multi-Agents, St-Baldolph, France. 15-17 mars, 1995. p. 3-14.

-
- [Lesser et Erman, 78] LESSER, V.R. et ERMAN, L.D. *A retrospective view of the HEARSAY-II architecture*. Computer Vision Systems, A. Hanson and E. Riseman (Eds.), New York : Academic Press, 1978. p. 790-800.
- [Lesser et Corkill, 88] LESSER, V.R. et CORKILL, D. *The Distributed Vehicle Monitoring Testbed : A tool for Investigating Distributed Problem Solving Networks*. R.S. Englemore and A. Morgan (Eds.), Blackboard Systems, chapter 18, New York : Addison-Wesley, 1988, p. 353-386.
- [Lorino, 91] LORINO, P. *Le contrôle de gestion stratégique*. Paris : Dunod, 1991. 213 p.
- [Lorino, 95] LORINO, P. *Comptes et récits de la performance : Essai sur le pilotage de l'entreprise*. Paris : Edition d'Organisation. 1995. 287 p.
- [Maire, 91] MAIRE, J.L. *OLYMPIOS: un Modèle de Conception du Système d'Information d'une Entreprise Manufacturière-Application à l'Audit*. Thèse Doct. : Université de Savoie, 1991. 149 p.
- [March, 69] MARCH J. et SIMON H. *Les Organisations*. Paris : Dunod, 1969. 253 p.
- [Maruichi, 89] MARUICHI, T. *Organizational Computation A framework for distributed cooperative problem solving using autonomous Agents and their groups*. Thesis. Japan : Keio University. 1989. 253 p.
- [Masini et al. 89] MASINI, G., NAPOLI, A. COLNET, D. LEONARD, D. et TOMBRE, K. *Les langages à Objets: Langages de classes, langages de frames, langages d'acteurs*. Paris : InterEditions, 1989. 583 p.
- [Mélèse, 79] MELESE, J. *Approches Systémiques des Organisation: vers l'Entreprise à Complexité Humaine*. Paris : Hommes et Techniques, 1979. 158 p.
- [Mélèse, 91] MELESE, J. *L'analyse modulaire des systèmes*. Paris : Les Editions d'organisation, 1991. 235 p.
- [Meyer, 93] MEYER, B. *Systematic Concurrent Object-Oriented Programming*. Commun. ACM, 1993, Vol. 36, N° 9. p. 56-80.
- [Mintzberg, 79] MINTZBERG, H. *The Structuring of Organizations : a synthesis of the research*. Englewood cliffs (NJ) : Prentice Hall, 1979. 394 p.
- [Moraitis, 94] MORAITIS, P. *Paradigme Multi-Agent et Prise de Décision Distribuée*. Thèse Doct. : Université Paris-Dauphine, 1994. 301 p.
- [Morin, 77] MORIN E. *Le système, paradigme et / ou théorie*. In Modélisation et maîtrise des systèmes techniques économiques sociaux. Actes du congrès de l'Afcet, Suresnes (Fr) : Editions Hommes et Techniques, 1977, Tome 1. p. 44-53.

-
- [Mulkens, 93] MULKENS, H. *Les Nouvelles Organisations Productives*. Revue Française de Gestion Industrielle, 1993, Vol. 12, N° 3. p.5-30.
- [Nadoli, 89] NADOLI, G., et BIEGEL, J.E. *Intelligent Agents in the Simulation of Manufacturing Systems*. Advanced in AI and Simulation, The Society for Computer Simulation, San Diego (CA), Vol.4. pp. 118-123.
- [Newell, 62] NEWELL, A. *Some Problems of the basic organization in problem-solving programs*. In Proceedings of the second conference on self-organizing systems. Washington : Spartan Books, 1962. 563 p.
- [Nii, 86] NII, H.P. *Blackboard Model of Problem solving and the Evolution of Blackboard Architectures*. Artificial Intelligence, 1986, Vol.7, N° 2. p. 38-53.
- [Okongwu, 90] OKONGWU, U. *Contribution à la formalisation de concept de flexibilité des systèmes industriels*. Thèse de Doct. : Institut National Polytechnique de Lorraine, 1990. 429p.
- [Orlicky, 75] ORLICKY, J. *Material Requirements Planning: the New Way of Life in Production and Inventory Management*. New-York : Mc Graw-Hill, 1975. 292 p.
- [Ouzrout et al. 94a] OUZROUT, Y., YE, X.J., VINCENT, L. et JULLIEN, B. *Designing and Implementing a Process-Oriented Simulation Environment*. In Proceedings of the CEEDA Conference, Bournemouth (UK), april 7-8, 1994. p. 469-474.
- [Ouzrout et al. 94b] OUZROUT, Y., SENOUNE, R. *Using Knowledge-Based System to Object-Oriented Manufacturing Systems Simulation*. In Proceedings of the ESS'94 Conference, Istanbul, October 9-12, 1994. p. 309-313
- [Ouzrout et al. 95] OUZROUT, Y., VINCENT, L. et JULLIEN, B. *The System Paradigm : Prelude to Manufacturing System Simulation Modeling*. SCS'95 conference, Ottawa, Canada, July 24-26, 1995. p. 3-8.
- [Ouzrout et Vincent, 95] OUZROUT, Y., VINCENT, L. *La Simulation comme Support d'Etude de l'Entreprise Réactive*. Congrès Institut Français de Mécaniques Avancées, Clermont-Ferrand, 14 Juin 1995. p. 25-31.
- [Ouzrout et al. 96] OUZROUT, Y., KABACHI, N and VINCENT, L. *Application des Systèmes Multi-Agents à la Simulation d'Organisations Productives*. Journée du Programme de Recherche Coordonnées-Intelligence Artificielle sur les Systèmes Multi-Agents, Toulouse, 02 Février 1996. p. 81-92.
- [Ovalle et Garbay, 93] OVALLE, A. et GARBAY, C. *Identification cognitive, modélisation conceptuelle et implantation technologique : vers une méthodologie pour la conception de SMA*. In Proceedings Premières Journées Francophones Intelligence Artificielle Distribuée & Systèmes Multi-Agents, Toulouse (Fr), Avril, 1993. p. 33-44.

-
- [Pegden et al. 90] PEGDEN, C.D., SHANNON, R.E. et SADOWSKI, R.P. *Introduction to Simulation Using SIMAN*. New-York : McGraw-Hill, Inc, 1990. 615 p.
- [Pierreval, 90] PIERREVAL, H. *Les Méthodes d'Analyse et de Conception des Systèmes de Production*. Paris : Editions Hermès, 1990. 62 p.
- [Pritsker, 86] PRITSKER, A.A. *Introduction to Simulation and SLAM II*. New York : John Willey & Sons Ltd., 1986. 839 p.
- [Proth, 92] PROTH, J.M. *Conception et Gestion des Systèmes de Production*. Paris : PUF, 1992. 302 p.
- [Rasmussen, 83] RASMUSSEN, J. *Skills, rules and knowledge, signals, signs, and symbols and other distinctions in human performance models*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1983, Vol. 13. p. 255-266.
- [Rochfeld, 93] ROCHFELD, A. et BOUZEGHOUB, M. *From Merise to OOM*. Ingénierie des Systèmes d'Information. 1993, Vol. 1, N° 2, p. 151-176.
- [Rodde, 90] RODDE, G. *Les Systèmes de Production: modélisation et performances*. Paris : Hermès, 1990. 333 p.
- [Rose, 92] ROSE, O. *SIM Plus Plus, User Manual*. University of Karlsruhe, Germany, juin 1992. 55 p.
- [Rumbaugh et al. 91] RUMBAUGH, J., BLAHA, M., PREMERLANI, W., EDDY, F. et LORENSEN, W. *Object-Oriented Modeling and Designing*. Englewood Cliffs (N.J) : Prentice Hall, 1991. 354 p.
- [Searle, 90] SEARLE, J. *L'esprit est-il un programme d'ordinateur ?*. Pour la Science, 1990, Vol. 149. p. 38-44.
- [Shlaer et al. 92] SHLAER, S. et MELLOR, S. *Object LifeCycles: Modeling the World in States*. Englewood Cliffs (N.J) : Prentice-Hall, 1992. 251 p.
- [Shmidt, 91] SHMIDT, K. *Cooperative Work : A conceptual framework*. In Distributed Decision Making : Cognitive Models for cooperative Work. J. Rasmussen, B. Brehmer and J. Leplat, Eds. New York : John Wiley & Sons Ltd. 1991. p. 75-110.
- [Shoham, 93] SHOHAM, Y. *Agent-Oriented Programming*. In Artificial Intelligence, 1993, Vol. 60. p. 51-92.
- [Simon, 74] SIMON H. *La science des systèmes, science de l'artificiel*. Paris : Epi Editeurs, 1974. 159 p.
- [Simon, 80] SIMON H. *Le nouveau management - La décision par les ordinateurs*. Paris : Economica, 1980. 159 p.

[Smith, 80] SMITH, R.G. *The contract net protocol : high level of communication and control in a distributed problem solving*. IEEE Transaction on Computers, 1980, Vol. c-29, N° 12. p. 1104-1113.

[Stroustrup et al. 87] STROUSTRUP, B. et SHOPIRO, J.E. *A Set of C++ Classes for Co-routine Style Programming*. Proceeding and Additional Papers C++ Workshop, Santa Fe (NM), novembre 9-10, 1987. p. 417-439.

[Terry, 83] TERRY, A. *The CRYSLIS project : Hierarchical Control of Production Systems*. Heuristic Programming Project, Computer Science Department, Stanford University, Stanford (CA), May, 1983. 184 p. Technical Report HPP-83-19.

[Thiel, 93] THIEL D. *Management Industriel, une approche par la simulation*. Paris : Economica, 1993. 233 p.

[Torrance, 91] TORRANCE, M.C. *The AGENT0 Manual*. Artificial Intelligence Laboratory Massachusetts Institute of Technology, USA, 1991. 15 p.

[van Gigch, 87] VAN GIGCH, J. P. : *Decision making about decision making : Metamodels & meta systems*. Cambridge (MA) : Abacus Press, 1987. 293 p.

[van Gigch, 91] VAN GIGCH, J. P. *System design modeling and metamodeling*. New York : Plenum Press, 1991. 453 p.

[Varela, 89] VARELA, F.J. *Autonomie et connaissance - Essai sur le Vivant*. Paris : Seuil, 1989. 247 p.

[Vignal, 94] VIGNAL, L. *La Négociation: Une Utilisation Constructive des Conflits en Résolution de Problèmes*. Acte des 2ème Journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents, Grenoble, France, 1994. p. 157-168.

[Vina et al. 91] VINA, A., ASH, D. et HAYES-ROTH, B. *Engineering reactive agents for real time control*. In proceedings of the 11th journées internationales sur les systèmes experts. Avignon : EC2, 1991. p. 439-454.

[Vincent et al. 92] VINCENT, L., MIRY, S. et GIRARD M-A. *SIM'1: une Pédagogie de l'Intégration Productique*. 1er Colloque Productique et Formation, Marseille, France, Octobre 27-28, 1992. p. 145-150.

[Write et al. 88] WRITE, T. et GRZYBOWSKI, R. *Object Based Simulation: Foundations and Implementation in Modula-2*. In Proceedings of the European Simulation Multiconference, Nice, France, juin 1-3, 1988. p. 193-198.

[Woodward, 65] WOODWARD J. *Industrial organization : Theorie and Practice*. London : Oxford University Press, 1965. 281 p.

[Wooldridge, 94] WOOLDRIDGE, M. and JENNINGS, N.R. *Formalizing the cooperative problem solving process*. In Proceedings of the 13th International Workshop on Distributed Artificial Intelligence (IWDAI-94), Lake Quinalt (WA), 1994. p. 403-417.

[Ye et al. 93] YE, X.J., OUZROUT, Y. et MATHON, A. *Conception d'une Plateforme de Simulation de Système de Production par les Objets*. In the Proceeding of Industrial Systems Engineering, Marseille, France, december 15-17, 1993. p. 189-196.

[Ye, 94] YE, X.J. *Objets-Oriented Process Simulation*. In the Proceeding of European Simulation Multiconference, Barcelone, Espagne, juin 1-3, 1994. p. 86-92.

[Ye, 1994] Ye, X. *Modélisation et Simulation des Systèmes de Production: Une Approche Orientée-Objets*. Thèse Doct. : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1994. 249 p.

[Yonezawa, 90] YONEZAWA, A. *ABCL - An Object-Oriented Concurrent System*. Cambridge (MA) : MIT Press, 1990. 245 p.

[Zarifian, 94] ZARIFIAN P. *gestion par activités, gestion par processus, gestion par projets: quelles différences ? quels rapports ?*. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Université Paris Val-de-Marne, février, 1994. 24 p. Article interne du Laboratoire Techniques, Territoires et Sociétés, PZ-22/04/94.

[Zarifian, 95] ZARIFIAN P. *L'émergence de l'organisation par processus : à la recherche d'une difficile cohérence*. In. Cohérence, pertinence et évaluation, Paris : Ecosip Economica, 1995. p. 1-21.

ANNEXE A

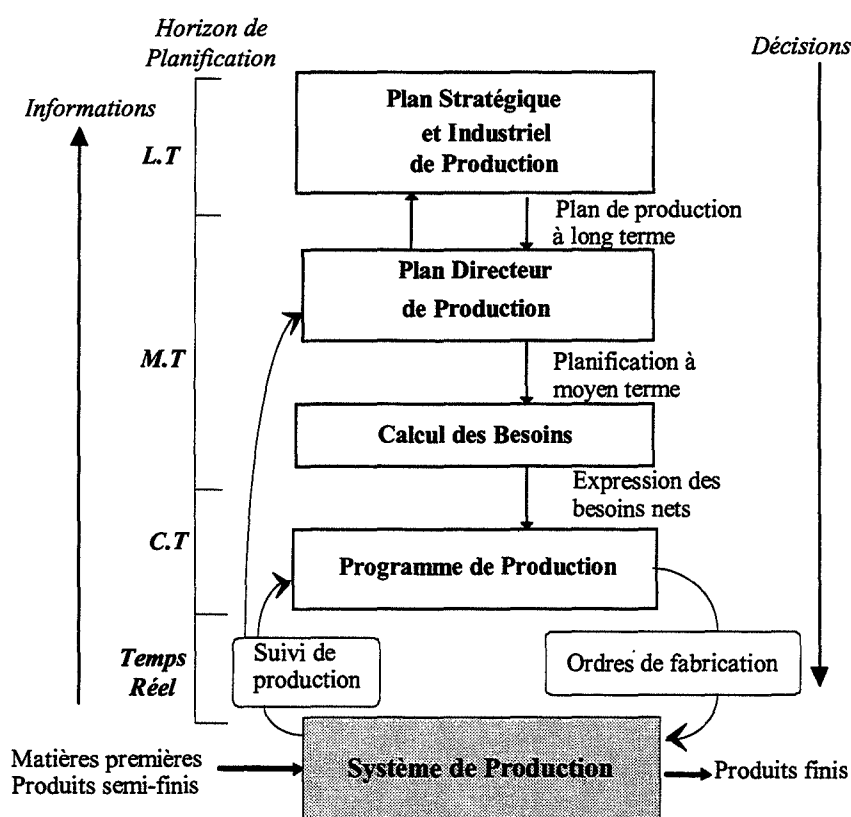
LES METHODES DE GESTION DE PRODUCTION

Présentation de méthodes de gestion de production utilisées dans le chapitre VI

Dans cette annexe, nous allons présenter les principales méthodes utilisées en gestion de production :

1 La Méthode M.R.P

La méthode de gestion de production M.R.P. (Manufacturing Resource Planning ou Material Requirement Planning) [Orlicky, 75] est traditionnellement associée à la logique de gestion par planification. Une planification a pour but de décrire, pour une échelle temporelle définie par un horizon de planification, un *plan de production* qui répond entre autres aux questions suivantes : que produire ? quand produire ? quelle quantité produire ?



La logique de gestion par planification apparaît dans la méthode M.R.P. au travers de l'enchaînement de plans de production :

1.1 Plan Stratégique et Industriel de Production

Le plan stratégique et industriel de production exprime les ventes connues et espérées de produits, ainsi que la production et les stocks, réels et prévisionnels de ces familles. On se base

essentiellement sur une analyse de l'historique en définissant un modèle des commandes le plus proche de la réalité ; ce qui permet de déterminer, en raisonnant sur des familles de produits, un niveau de production mensuel acceptable fixant l'objectif stratégique de l'entreprise.

1.2 Plan Directeur de Production

A partir des prévisions des tendances du marché, des comportements du système de production et de la stratégie à suivre, le plan directeur de production traduit les objectifs, par produit, des prévisions exprimées en familles de produits. Son horizon de planification est en général de quelques mois et est découpé par périodes de réactualisation d'une semaine. Cet horizon de planification est calculé à partir de la somme des temps opératoires sur la gamme de fabrication et des temps inter-opératoires (temps de transport et temps d'attente) du produit.

1.3 Calcul des Besoins

Son but est de déterminer, pour une période donnée, les besoins en articles à fabriquer ou à acheter. Le calcul des besoins est réalisé à partir des nomenclatures des produits. Une nomenclature donne les produits dont on doit disposer en stock et les composants dont il faut disposer (achetés ou fabriqués). Les dates des besoins exprimées par le calcul des besoins sont comparées aux stocks prévisionnels, ce qui permet de déduire des ordres de fabrication ou des ordres d'achats.

1.4 Programme de Production

Le résultat du calcul des besoins est un ensemble d'ordres de fabrication, chaque ordre est caractérisé par une quantité et une date. Mais, ces O.F. ont été élaborés sans tenir compte de la capacité réelle du système. Le programme de production a pour but d'ajuster les capacités (production maximale en unités de produits par unité de temps) aux charges (utilisation sur une période d'un nombre d'unités de capacité). Son horizon est d'environ une, voire deux semaines. L'objet essentiel du programme de fabrication est de spécifier l'ordonnancement des tâches de fabrication, c'est-à-dire le lancement des différents O.F à réaliser en fonction de l'état de la production (suivi de production).

2 Le Juste-A-Temps (J.A.T.) et la Méthode Kanban

2.1 Le Juste-A-Temps

Le juste-à-temps est une logique de production, utiliser le J.A.T c'est acheter ou produire juste ce qu'il faut à la date exacte du besoin. Le but principal est la réduction des coûts et non pas l'optimisation de l'utilisation des moyens de production. Cette réduction est obtenue par une réduction des stocks, elle même résultat d'une bonne synchronisation entre la demande et la production. En effet, la production d'un produit est déclenchée par la demande (flux tiré) et non plus à partir de prévisions (flux poussé) comme c'était le cas pour la méthode M.R.P.

Le J.A.T est à l'origine du concept de « flux tendu », il est lié aux démarches de « qualité totale » et d'« amélioration permanente » (zéro défaut, zéro panne, zéro campagne de production, zéro stock et zéro délai).

2.2 La Méthode Kanban

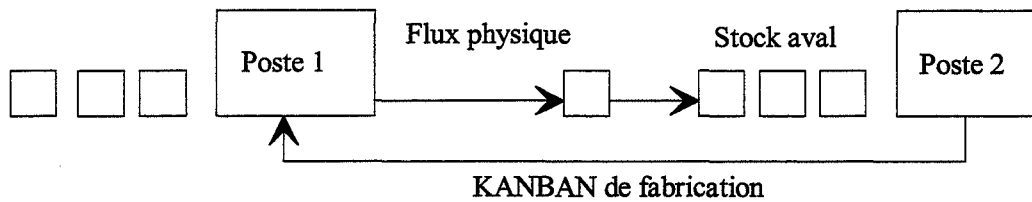
La méthode Kanban est généralement confondue avec la logique J.A.T. Le J.A.T concerne tous les niveaux de l'entreprise, c'est une chasse au gaspillage, alors que le Kanban est une méthode de gestion des flux uniquement issue de la logique J.A.T.

Un Kanban est un ordre de fabrication implicite correspondant à une opération :

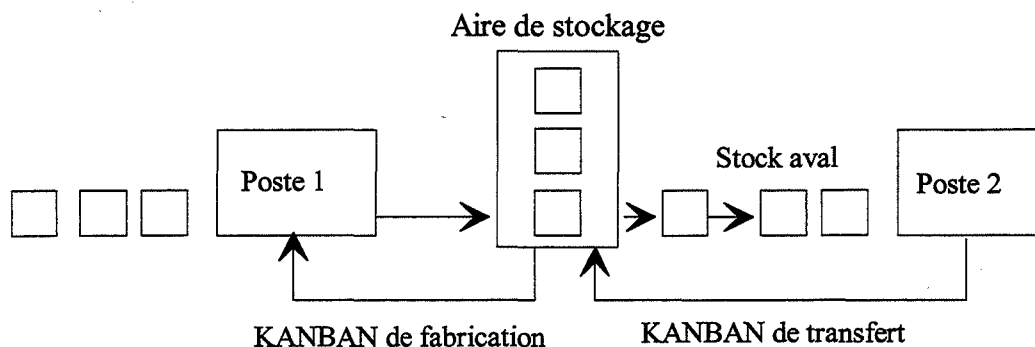
- définie du processus de fabrication, pour une référence précise du produit,
- effectuée sur un poste de travail déterminé,
- pour une quantité de pièces fixe, contenue généralement dans un conteneur.

Outre les Kanbans de fabrication qui circulent entre les centres de fabrication et l'aire de stockage située en aval de ces centres, les Kanbans de transfert sont des étiquettes qui circulent entre l'aire de stockage et les centres demandeurs.

KANBAN monocarte



KANBAN double fiches



La méthode Kanban a pour effet d'assurer une circulation de l'information de l'aval vers l'amont, la production en amont est orientée par les fabrications réelles de l'aval. Le flux de production se trouve plus ou moins tendu suivant le nombre de Kanbans présents dans le système. En effet, puisque aucun conteneur ne peut être produit en l'absence de Kanban, le nombre de conteneurs d'une référence en attente à un poste ne peut dépasser le nombre de Kanbans. Le volume du flux est donc régulé par le nombre de Kanbans. En diminuant le nombre de Kanbans, on diminue automatiquement le niveau des en-cours de la référence.

En résumé, la méthode Kanban vise en priorité à augmenter la réactivité (flux tendu) du système de production de la manière suivante :

- la circulation simplifiée du flux matière est obtenue par une réimplantation des moyens de production (i.e. îlot de fabrication, cellule flexible). Cette implantation suppose une bonne standardisation des produits, et plus généralement une application de la technologie de groupe.
- le faible débit du flux matière est obtenu par la réduction de la taille des lots de fabrication, et la livraison des matières premières et composants en quantités variables et juste-à-temps. Ceci

suppose une forte adaptabilité des éléments qui concourent à la production, sous-traitants et fournisseurs inclus.

- l'homogénéité de la nature du flux matière est obtenue par la standardisation des produits et leurs fabrications en grande série. La méthode Kanban encourage la réduction de la taille des lots en supposant une forte adaptabilité des moyens de production: réglages rapides, changements rapides d'outillages, polyvalence, etc.
- le suivi et le pilotage de la production sont décentralisés et simplifiés. Les flux d'information qui assurent la régulation du flux matière sont constitués par les Kanbans.

3 La Méthode O.P.T.

La méthode O.P.T. (Optimized Production Technology) [Goldratt et al. 86] est née d'une réflexion critique sur de nouveaux objectifs pour la gestion de production :

- augmenter le produit des ventes, c'est-à-dire l'argent généré par les ventes;
- diminuer les dépenses d'exploitation, c'est-à-dire l'argent dépensé pour produire;
- et augmenter la trésorerie, c'est-à-dire retarder l'engagement d'argent pour produire (retarder le temps d'achat de matières premières), accélérer le retour sur engagement.

La méthode O.P.T. considère en premier lieu que l'élaboration d'un plan de production consiste à satisfaire *simultanément* des contraintes de nature différente. Ces contraintes sont d'ordre technique (capacité d'un moyen de production), d'ordre économique (la valeur ajoutée d'un produit) et d'ordre externe (la commande d'un client). Deux idées étoffent cette logique :

- toutes ces contraintes ne sont pas indépendantes parce que les événements de la production ne sont eux-mêmes pas indépendants. Ainsi par exemple, la capacité d'un moyen de production ne pose pas globalement de problème dans l'élaboration du plan de production si le suivi de production montre qu'il n'est jamais saturé. Satisfaire cette contrainte localement (saturer le moyen de production en vue de l'employer pleinement) revient à augmenter le débit matière du moyen de production amont qui l'alimente.

- une minorité de ces contraintes conditionne l'obtention d'un plan de production optimisé. L'expérience montre que ce sont celles induites par les moyens de production *goulots*

d'étranglement. On peut définir un moyen de production goulot comme un moyen dont le rapport charge/capacité sur une période est souvent supérieur à 1.

Sur la base de ces deux idées fondamentales, les principes de cette méthode sont :

| N° | Règles O.P.T. | Règles classiques |
|----|---|---|
| 1 | Equilibrer les flux, non les capacités | Equilibrer les capacités puis essayer d'équilibrer les flux |
| 2 | Le niveau d'utilisation d'une ressource non goulot n'est pas déterminé par son propre potentiel mais par d'autres contraintes du système | Le niveau d'utilisation d'une ressource est déterminé par sa propre capacité |
| 3 | Utilisation et activation d'une ressource sont à distinguer | Utilisation et activation d'une ressource sont synonymes |
| 4 | Une heure perdue sur un goulot est une heure perdue sur l'ensemble du système | Une heure perdue sur un goulot est seulement une heure perdue sur cette ressource |
| 5 | Une heure gagnée sur une ressource non goulot ne rapporte rien | Une heure gagnée sur une ressource est une heure gagnée quelle que soit la ressource |
| 6 | Les goulots déterminent à la fois le débit de sortie et le niveau des stocks | Les goulots limitent temporairement le débit de sortie mais ont peu d'effet sur les niveaux des stocks |
| 7 | Le lot de transfert peut, et souvent doit, ne pas être égal au lot de fabrication | Il faut éviter l'éclatement et le chevauchement des lots lancés |
| 8 | Les lots de fabrication peuvent varier selon les opérations | Un lot lancé doit rester entier |
| 9 | Les ordonnancements doivent être faits en considérant l'ensemble des contraintes du système. Les temps d'attente sont des variables dynamiques et non des données | Les ordonnancements doivent être effectués par la suite d'actions suivantes: 1) détermination de la taille des lots, 2) calcul des délais, 3) désignation des priorités en fonction des délais, 4) ajustement des ordonnancements successifs aux contraintes apparentes de capacité |
| 10 | La somme des optimums locaux n'est pas l'optimum global | La seule manière d'atteindre un optimum global est de rechercher les optimums locaux |

Les règles 1 et 2 vont à l'encontre de l'idée généralement admise qui consiste à considérer que la maximisation des taux d'utilisation de toutes les ressources est un objectif en soi. La méthode O.P.T différencie nettement les ressources goulots des ressources non-goulots et

suggère de maximiser uniquement le taux d'utilisation des ressources goulots (pour éviter des stocks inutiles).

Les règles 3, 4, 5 et 6 signifient que la productivité du système est déterminée par les ressources goulots et non pas par toutes les ressources prises indépendamment.

Les règles 7 et 8 remettent en cause le principe de quantité économique qui fixe la même taille pour les lots à fabriquer et à transférer. Le transfert de quantités plus faibles que celles des lots de fabrication permet d'accélérer la mise à disposition des produits devant les moyens de production goulots, alors que la taille des lots de fabrication est plus grande pour les moyens de production goulots afin d'en diminuer les réglages, les changements d'outillages, etc. Cela n'est pas nécessaire pour un moyen de production non-goulot, car par nature, son niveau d'utilisation lui assure une certaine disponibilité. Son plein emploi n'est donc pas un objectif majeur, et son utilisation peut s'accommoder d'une taille de lots de fabrication plus petite.

La règle 9 préconise de prendre en compte les contraintes matières (ordres de fabrication à réaliser) et les contraintes de capacités de moyens de production simultanément. Les délais de fabrication sont le résultat d'un programme et ne peuvent donc pas être prédéterminés.

La devise de la méthode O.P.T. résumant ainsi l'ensemble des 9 règles énoncées, est que la somme des optimums locaux n'est pas l'optimum global du système, règle 10.

ANNEXE B

SIM_PP : UN LANGAGE DE SIMULATION OBJET

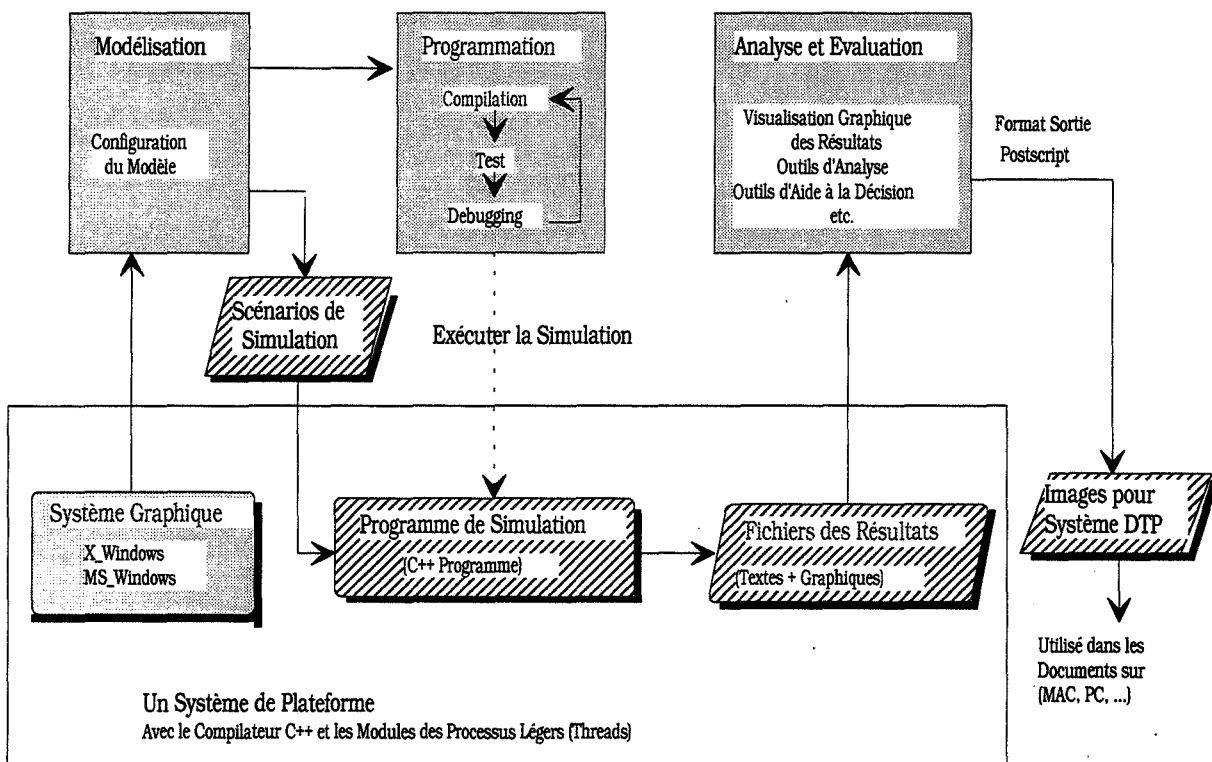
Présentation de SIM_PP, une bibliothèque de classe C++ pour la simulation à événements discrets orientée processus.

Dans cette annexe sont résumées les principales caractéristiques de la bibliothèque de classes d'objets C++, SIM_PP :

1 GENERALITES

Le progiciel SIM_PP est un langage de simulation à événements discrets orienté *Processus*, basé sur le langage de programmation C++. Il a été développé à « l'Institut of Telematics » à l'université de Karlsruhe en Allemagne [Rose, 92]. L'architecture de fonctionnement de ce progiciel est décrite dans la figure suivante :

ARCHITECTURE DE SIMULATION



SIM_PP fonctionne avec le compilateur Borland C++ [Borland, 93] pour windows ou avec Gnu C++ sous Unix.

2 LES CLASSES DE BASE

Un objet dans SIM_PP est composé de trois types d'éléments :

. « **Data elements** » qui donnent les valeurs des variables pour une instance donnée de la classe d'objet. Elles peuvent être soit publiques, soit privées.

. « **Methods** », ce sont des procédures, identiques à celles écrites en langage C, qui ont accès aux « data elements » des objets.

. « **Process** », ce sont des méthodes particulières qui peuvent influencer sur le temps de simulation. Ces *process* ont une durée d'activation et peuvent être interrompus et réactivés après un laps de temps. Leur contenu correspond à la description du comportement de l'objet actif dans lequel il est déclaré.

. **Déclaration de Process :**

Les *process* sont déclarés de la manière suivante dans la déclaration de la classe :

```
Class < ... >
{
    Process ( Proc name ) ( < parameters > );
}
```

Puis dans une implémentation de la classe :

```
PROC ( < class name >, < proc name > ) ( < parameters > )
{ ( < local parameters > );
    StartProcess ( < proc name > );
    /* code décrivant le comportement de l'instance */
    EndProcess();
}
```

2.1 Mécanismes de Base

. **Activation de Process :** Il y a deux manières d'activer les process :

- *Activation synchrone de process* : le demandeur est obligé d'attendre que le process à activer soit terminé avant de poursuivre son exécution.

```
    BOOLEAN WaitFor ( < proc_name >, < parameters > );
```

Le processus en cours verra son exécution interrompue jusqu'à la fin du process <proc_name>.

- *Activation asynchrone de process* : le demandeur n'attend pas que sa requête soit satisfaite pour poursuivre le déroulement de son exécution.

```
    Activate ( < proc_name >, ( < parameters > ), double time = n );
```

Le process <proc_name> sera déclenché immédiatement au temps $T = \text{SimTime} + n$.

. **Ecoulement du temps de simulation :**

```
    BOOLEAN Wait ( double time );
```

Le process en cours est interrompu pendant une durée égale à « *time* ». Cette méthode permet de simuler une durée d'exécution d'un traitement particulier.

. **Terminer un process :**

L'arrêt prématuré d'un process P peut se faire par l'appel à la routine **Terminate()**. Tous les process activés de manière synchrone et concernés par le processus P seront arrêtés également.

. **Interrompre un process :**

Pour cela, deux méthodes sont proposées :

Interrupt (< object >, < object class >, < process >);

InterruptAll (< object >) pour interrompre tous les process actifs d'une classe.

. **Autres Méthodes :**

Les autres méthodes qui permettent la gestion des *process* sont :

- . **CreateProcess()** : Création d'un process et sauvegarde de son environnement (stack),
- . **EndProc ()** : La fin d'un processus (arrive à son terme),
- . **Cleanup()** : Détruit les process qui sont dans la liste statique du module (à la fin de la simulation),
- . **MainTask()** : C'est la première tâche à effectuer lors d'une simulation, elle déclenche l'exécution des process,
- . **InsertEnv()** : Active les process en les insérant dans la liste « WaitList » ,
- . **RemoveProc()** : Détruit un processus,
- . **NextTask()** : Détermine le prochain process à exécuter, elle va scanner la « WaitList » .

2.2 Mécanismes de Synchronisation

. **Les « Trigger Objects »**

Une classe d'objets « TriggerObj » est intégrée à la bibliothèque SIM_PP pour gérer la synchronisation des processus.

Un process P, obligé d'attendre qu'un événement particulier E (exemple attente de ressource pour un centre d'activité) arrive pour être exécuté va appeler la méthode :

BOOLEAN WaitForTrigger (< TriggerObject>),

dans laquelle TriggerObject est un pointeur vers un objet O1 de la classe TriggerObj. Cet appel va entraîner l'intégration du process P1 dans la « Waiting List » de l'objet O1 et une attente de P1 jusqu'à ce qu'un autre process active les routines **Trigger()** ou **TriggerFirst()** de l'objet O1.

Les principales fonctions et méthodes pour la synchronisation à l'aide de *Trigger* sont :

. **PROC(TriggerObj, Fire)()** : le process sera intégré dans la « Wait List » de l'objet et attendra un signal pour être exécuté.

. **PROC(TriggerObj, Trigger)**() : déclenchement de tous les *process* qui sont en attente du signal *Trigger*,

. **PROC(TriggerObj, TriggerFirst)**() : déclenchement du premier *process* parmi les process en attente du *Trigger*,

. **InterruptTrigger()** : Interruption de tous les *process* en attente du *Trigger*.

. Les « Sémaphores »

Les sémaphores sont utilisées pour synchroniser les accès de multiples entités dans un *Shared Element* (file d'attente). Ce qui permet de gérer les synchronisations au niveau des ressources partagées.

Un process P1 déclenche de manière synchrone le sémaphore par l'appel à la méthode `Get()` :

WaitFor(Semaphore.Get()),

si le sémaphore n'est pas utilisé par un autre process, le *process* P sera réactivé par l'environnement de simulation. Sinon le *process* P sera bloqué jusqu'à ce que le process possédant le sémaphore termine son exécution et le libère par le biais de la méthode :

Release() : libère le sémaphore,

. Les « Rendez-Vous Objects »

Ces objets permettent d'avoir un mécanisme du type : un *process* ne sera déclenché que quand tous les participants (invités au rendez-vous) seront présents.

Pour cela le process principal est :

. **PROC** (*Rendez-VousObj*, **RendezVous**) (*void*): Ce processus utilise des signaux de type *Trigger* pour gérer l'exécution du processus de rendez-vous.

2.3 Les Classes Utilitaires

* *Les Listes* : les classes génériques des différentes listes possibles sont :

- . **DList** : qui représente les doubles listes, avec pour entités des *ListMembers*.
- . **QueueObj** : liste qui hérite de *ListMember* et qui est gérée en FIFO. C'est la classe générique de :
 - > **StackObj** : liste gérée en LIFO;
 - > **RankedObj** : liste ordonnée (méthode *Rank()*).

Les principales fonctions et méthodes associées aux listes sont :

- . **First**(*void*) : Renvoie le premier élément de la liste,
- . **Last**(*void*) : " " " dernier " " " " " " ;
- . **Add**(*ListMember *member*) : Ajoute un élément,
- . **AddFirst**(*ListMember *member*) : Ajouter un élément en début de liste,
- . **Remove**(*void*) : Destruction d'un élément,
- . etc.

* *Générateur de nombres aléatoires* : la classe « *RandNumGen* », cette classe implémente un nombre de niveau pseudo-aléatoire. Les trois générateurs principaux sont :

RandomGenerator { **Simscript** },
RandomGenerator { **Fishman** },
RandomGenerator { **Bratley** }.

* *Horloge de Simulation (simulation clock)* : pour connaître la date courante de la simulation il faut utiliser la méthode **SimTime()**, et pour le réactualiser **ResetSimTime()**.

* *Classes Statistiques* : exemples de classes d'objets) pour le calcul et le suivi statistique de la simulation .

- . TallyObjects --> TallyMean,
--> TallyVariance.
- . Accumulate objects,
- . Quantile, etc.

* *Présentation graphique des résultats* : pour cela il existe plusieurs classes :

- . BaseHistogram : classe qui est générique à tous les types d'histogramme possibles
 - > class PHistogram,
 - > class Histogram, etc.

2.4 Fonctionnement

SIM_PP utilise le mécanisme de « Coroutine » (associée à un *process*) pour gérer les différentes synchronisations présentées précédemment.

Pour interrompre correctement l'exécution d'une *coroutine* et la réactiver plus tard, il faut sauvegarder l'état courant de cette *coroutine* au moment de l'interruption. Cet état est composé de :

- tous les registres du processeur,
- les variables locales de la coroutine,
- l'ensemble des paramètres associés.

On retrouve les variables locales et les paramètres de la *coroutine* en cours d'exécution dans la « *Stack Frame* » associée à cette coroutine. Toutes les fois qu'un *process* suspend son exécution, le *process* suivant qui doit être activé est pris dans la liste des événements en instance d'exécution. Cette liste est manipulée par le biais d'appel à des fonctions du type Wait(), Terminate(), ... Le passage au nouveau *process* se fait avec la fonction **Transfer()**

Ainsi les étapes du passage d'un *process* à un autre sont :

- Sauvegarde de la « *Stack Image* » du *process* actif,
- Réécriture de la pile avec la « *Stack Image* » du nouveau *process*.

La fonction Transfer() est définie dans la classe « **Task** » qui est composée de :

- la taille de la « *Stack* » du *process* sauvegardé,
- un pointeur vers l'emplacement dans la heap dans lequel on peut trouver la « *Stack Image* »
- la taille de la surface allouée pour la « *Stack* »,
- un vérificateur « *Checksum* » calculé sur l'image de la *Stack*.

ANNEXE C

RESULTATS DETAILLES DES SIMULATIONS

Présentation des résultats des simulations effectuées dans le chapitre VI.

1 LE JEU DES ALLUMETTES

Les paramètres et résultats du « jeu des allumettes » sont présentés de manière synthétique, dans ses différentes configurations, dans les figures suivantes (un tableau récapitulatif des valeurs obtenues est présenté à la suite de ces figures).

Les Paramètres de simulation :

Durée des Simulations : 3 semaines, (720 unités de temps)

Période d'évaluation : 1 semaine, (240 unités de temps)

Prise de Décision : Selon les scénarios : à la journée ou par heure

Quantité à produire : Selon les scénarios : de 100 à +140 allumettes par semaine

LES SCENARIOS : au total : 6

Méthode 1 : Production MAX, Scrutation à la journée,

Quantité à produire 140 allumettes.

Méthode 2 : Réajustement des Stocks à la Journée

Quantité à produire 120 allumettes.

Méthode 3 : Réajustement des Stocks pour les journées restantes

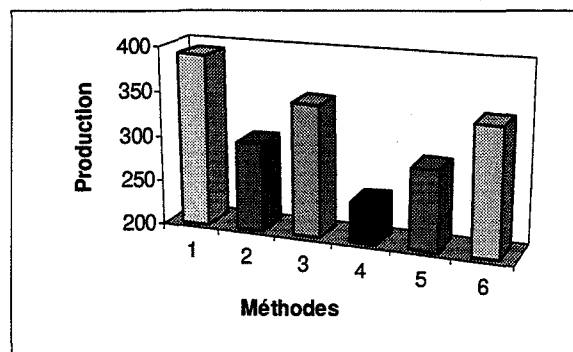
Quantité à produire 120 allumettes.

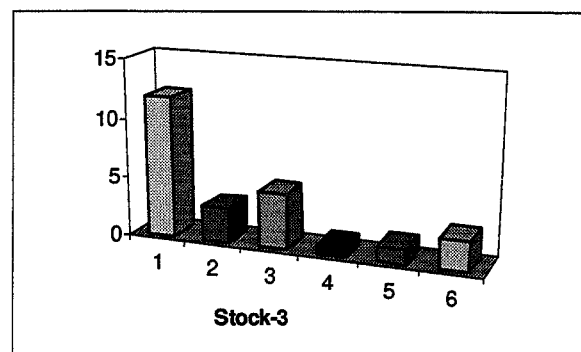
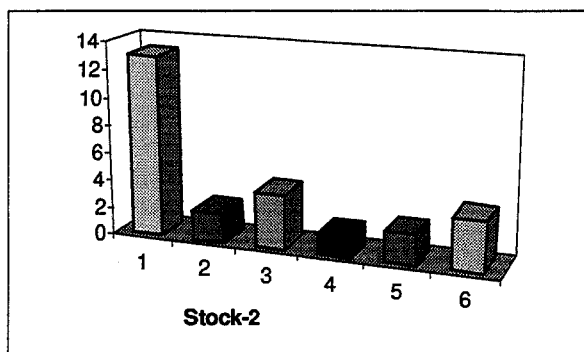
Méthode 4 : Kanban, Stock de Sécurité : 6

Méthode 5 : Kanban, Stock de Sécurité : 8

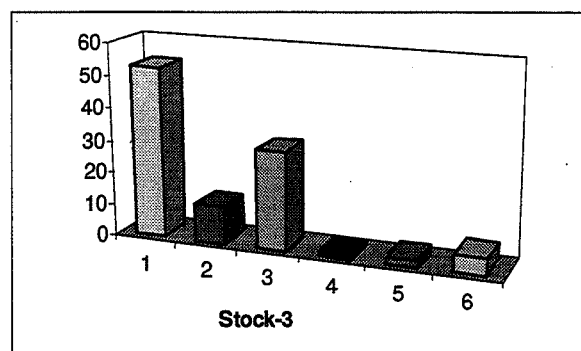
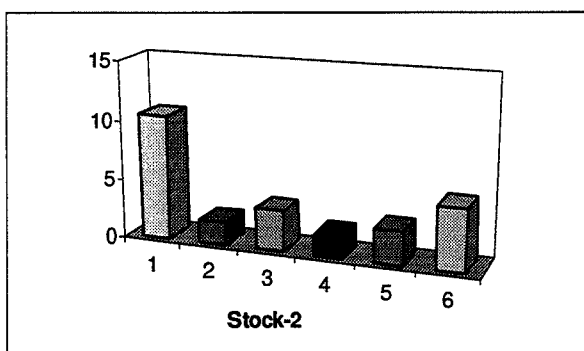
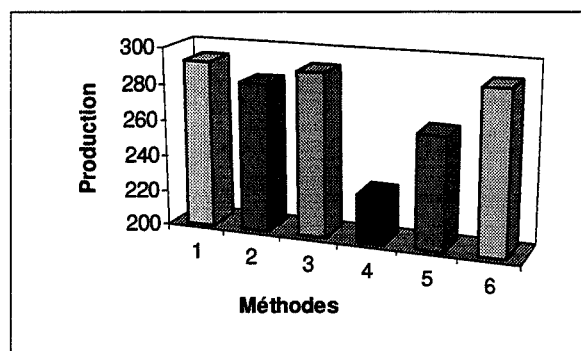
Méthode 6 : Kanban, Stock de Sécurité : 12

1.1 Configuration des dés : $CA_1^0 = 6$, capacité $CA_2^0 = 6$, capacité $CA_3^0 = 6$:

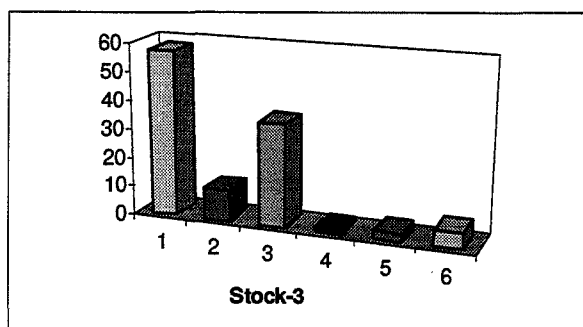
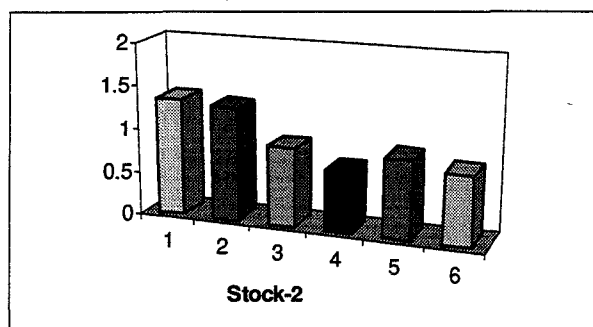
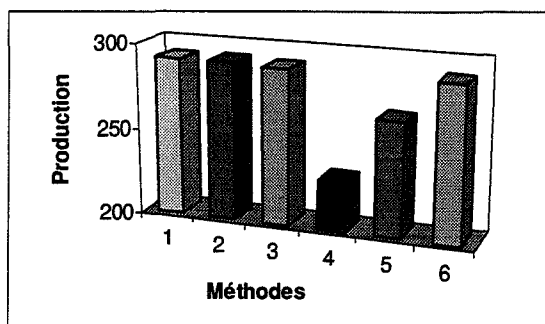




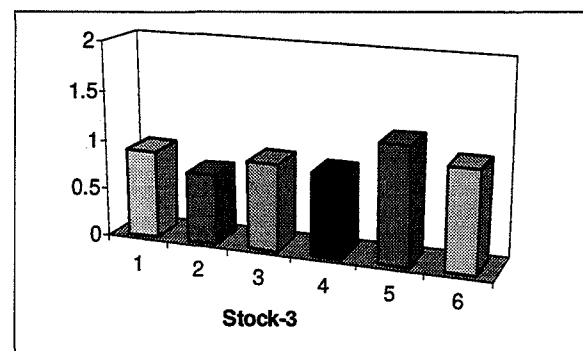
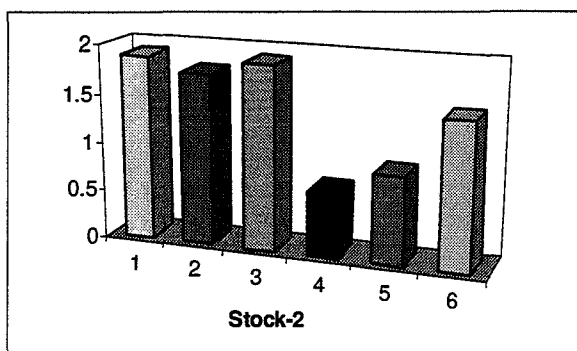
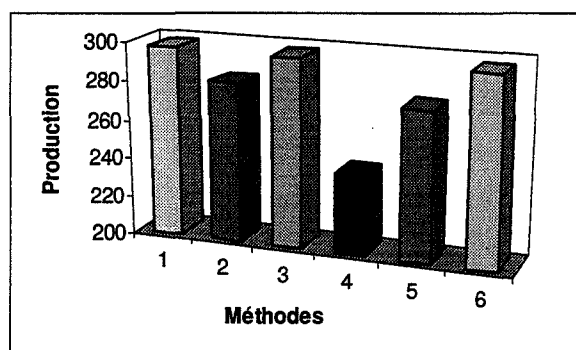
1.2 Configuration des dés : $CA_1^0 = 6$, capacité $CA_2^0 = 6$, capacité $CA_3^0 = 4$:



1.3 Configuration des dés : $CA_1^0 = 6$, capacité $CA_2^0 = 4$, capacité $CA_3^0 = 6$:



1.4 Configuration des dés : $CA_1^0 = 4$, capacité $CA_2^0 = 6$, capacité $CA_3^0 = 6$:



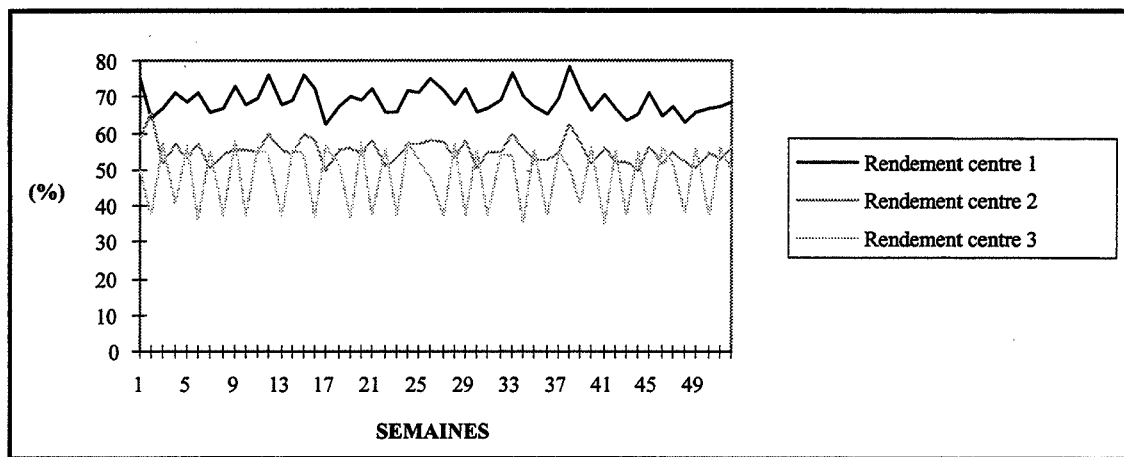
1.5 Tableau récapitulatif des résultats obtenus

| | Prod. Max | Prod. Min | Prod. Moyenne | Stock-2 Max | Stock-2 Min | Stock-2 Moyenne | Stock-3 Max | Stock-3 Min | Stock-3 Moyenne |
|--------------|--------------|--------------|------------------|----------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|--------------------|
| 6-6-6 | | | | | | | | | |
| M1 | 400 | 378 | 391 | 22.41 | 9.25 | 13.04 | 16.04 | 6.62 | 11.95 |
| M2 | 300 | 288 | 298.2 | 2.66 | 1.68 | 2.10 | 4 | 2.03 | 2.91 |
| M3 | 352 | 344 | 347 | 6.59 | 3.17 | 3.95 | 6.24 | 2.41 | 4.65 |
| M4 | 253 | 241 | 245.2 | 1.76 | 1.09 | 1.48 | 0.76 | 0.93 | 0.78 |
| M5 | 294 | 283 | 288.8 | 2.58 | 1.72 | 2.18 | 1.47 | 1.12 | 1.3 |
| M6 | 346 | 337 | 341.8 | 4.06 | 3.30 | 3.65 | 2.80 | 2.05 | 2.53 |
| 6-6-4 | | | | | | | | | |
| M1 | 314 | 280 | 292.33 | 22.14 | 9.25 | 10.5 | 57.09 | 49 | 53 |
| M2 | 294 | 275 | 282 | 2.6 | 1.9 | 1.9 | 18.5 | 6.51 | 11.5 |
| M3 | 294 | 280 | 291 | 7.6 | 3.2 | 3.4 | 44.15 | 20.17 | 30.5 |
| M4 | 227 | 221 | 226.83 | 1.64 | 2.26 | 1.75 | 1.06 | 1.33 | 1.2 |
| M5 | 272 | 257 | 262.83 | 2.37 | 3.03 | 2.8 | 1.92 | 2.45 | 2.20 |
| M6 | 301.6 | 273 | 290 | 4.6 | 6.3 | 5.3 | 5.12 | 3.9 | 5.3 |
| 6-4-6 | | | | | | | | | |
| M1 | 306 | 277 | 291.6 | 77.29 | 55.7 | 57.36 | 1.27 | 0.83 | 1.25 |
| M2 | 291 | 277 | 290 | 14.18 | 10.4 | 10.7 | 1.4 | 0.9 | 1.3 |
| M3 | 299 | 285 | 290.5 | 40.7 | 27.7 | 35.6 | 1.3 | 0.8 | 0.9 |
| M4 | 236 | 223 | 228.6 | 1.92 | 1.5 | 1.67 | 1.74 | 0.56 | 0.7 |
| M5 | 274 | 261 | 266.3 | 3.1 | 2.55 | 2.8 | 0.9 | 0.65 | 0.9 |
| M6 | 305 | 277 | 290 | 6.36 | 5.13 | 5.5 | 1.25 | 0.8 | 0.8 |
| 4-6-6 | | | | | | | | | |
| M1 | 312 | 289 | 297.83 | 1.08 | 0.89 | 0.89 | 2.08 | 1.42 | 1.89 |
| M2 | 288 | 275 | 281.83 | 1.3 | 0.7 | 0.8 | 2.2 | 0.8 | 1.3 |
| M3 | 311 | 289 | 296.83 | 1.1 | 0.89 | 0.9 | 2.5 | 1.06 | 1.89 |
| M4 | 246 | 236 | 241 | 1.18 | 0.84 | 0.86 | 0.73 | 0.52 | 0.66 |
| M5 | 284 | 270 | 276.33 | 1.3 | 0.92 | 1.2 | 1.08 | 0.84 | 0.9 |
| M6 | 304 | 289 | 296.16 | 1.5 | 0.9 | 1.03 | 1.61 | 1.03 | 1.5 |

2 L'ENTREPRISE « PMI »

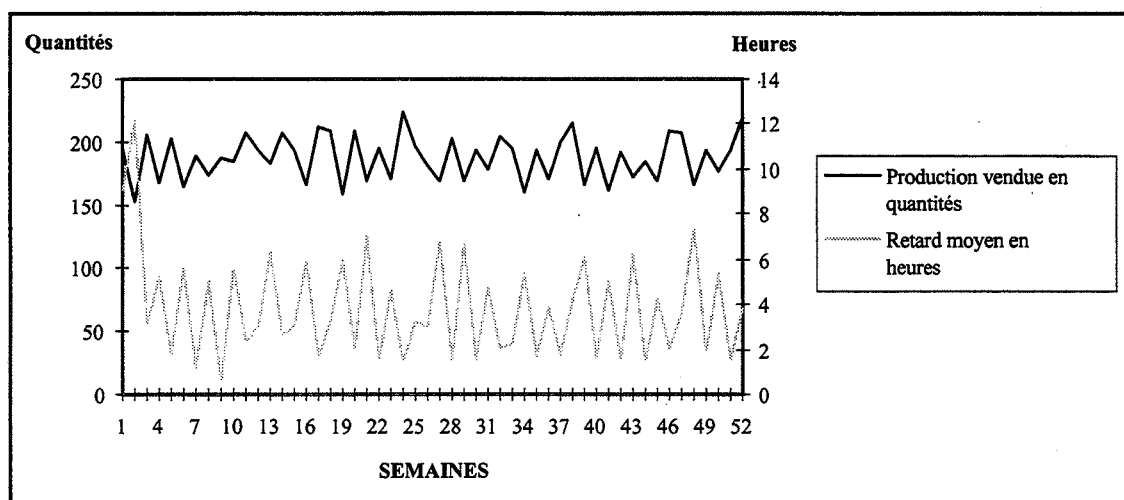
Détermination du Régime Transitoire

Pour déterminer les paramètres de simulation, nous avons effectué une première expérience de simulation sur 52 semaines. Au niveau physique, nous obtenons avec le *scénario 1* la courbe suivante qui représente le rendement de chacun des trois centres d'activités



Les variables atteignent assez rapidement un régime permanent (troisième semaine).

Cette remarque est confirmée par l'observation de l'évolution du retard moyen de livraison et de la production vendue sur une durée de 52 semaines :



Les résultats des simulations sont présentés dans les tableaux suivants. Les données sont exprimées en pourcentage de la population totale de la zone d'étude. Les simulations ont été réalisées à l'aide d'un modèle de simulation de type Monte Carlo, basé sur des données réelles de la population. Les résultats sont présentés sous forme de moyennes et d'écart-type, ainsi que de la distribution des données. Les données sont présentées sous forme de tableaux à double entrée, avec les résultats des simulations en lignes et les données réelles en colonnes. Les résultats sont présentés sous forme de pourcentage de la population totale de la zone d'étude. Les simulations ont été réalisées à l'aide d'un modèle de simulation de type Monte Carlo, basé sur des données réelles de la population. Les résultats sont présentés sous forme de moyennes et d'écart-type, ainsi que de la distribution des données. Les données sont présentées sous forme de tableaux à double entrée, avec les résultats des simulations en lignes et les données réelles en colonnes.

FOLIO ADMINISTRATIF

THESE SOUTENUE DEVANT L'INSTITUT DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

| | |
|--|--|
| NOM : OUZROUT (avec précision du nom de jeune fille, le cas échéant) Prénoms : YACINE | DATE de SOUTENANCE 05 Avril 1996 |
| TITRE : Modélisation et Simulation d'Organisations Productives Réactives : Une Approche Multi-Agents | |
| NATURE : Doctorat Formation doctorale : Ingénierie Informatique | Numéro d'ordre : 96ISAL0032 |
| Cote B.I.U. -Lyon : T 50/210/19 /. et bis CLASSE : | |
| RESUME : <p>L'objectif de cette thèse est de proposer une démarche méthodologique de conception d'un modèle de simulation de systèmes de production qui intègre une représentation des comportements distribués et cognitifs des acteurs décisionnels, et dont l'intérêt est de permettre d'étudier la pertinence de changements organisationnels dans ces systèmes. En effet, l'analyse des conditions d'évolution des systèmes de production et de leur contexte a permis de mettre en relief le besoin de « réactivité » pour faire face à un environnement de moins en moins stable et prévisible et devant lequel l'organisation doit chercher des alternatives à un fonctionnement planifié, prédictif, figé et séquentiel. Les réponses organisationnelles des entreprises à ces sollicitations s'expriment par un mouvement vers la flexibilité et l'intégration, et passent par un rapprochement entre la structure décisionnelle et la structure physique. Pour mettre en évidence cette nouvelle réalité, nous proposons un processus de modélisation qui débute par la construction d'un modèle conceptuel de compréhension des organisations, basé sur une représentation des processus de décision, et sur une formalisation des phénomènes d'orientation des comportements décisionnels. En parallèle, nous analysons les concepts associés à la problématique des systèmes multi-agents, systèmes qui étudient l'émergence de comportements collectifs résultant de l'activité coopérative de plusieurs entités autonomes « intelligentes » sur lesquelles l'expertise est répartie. Ces études convergent vers un modèle de simulation issu des techniques de simulation à événements discrets, dans lequel nous intégrons une modélisation du système décisionnel à base d'agents. Enfin, l'implémentation de ce modèle sera basée sur des techniques de simulation orientée objets (objets actifs, programmation concurrente), et sera validée sur deux exemples.</p> | |
| MOTS-CLES : Système Production, Organisation, Prise Décision, Systémique, Simulation, Orienté Objet, Intelligence Artificielle. | |
| Laboratoire (s) de recherches : Centre SIMADE, Ecole des Mines de Saint-Etienne | |
| Directeur de thèse : Monsieur Albert MATHON, Professeur | |
| Président de jury : Composition du jury : J.P. KIEFFER, J. QUINQUETON, J. AYEL, J. FAVREL, A. MATHON, H. PIERREVAL, C. SAYETTAT, L. VINCENT. | |

RESUME

L'objectif de cette thèse est de proposer une démarche méthodologique de conception d'un modèle de simulation de systèmes de production qui intègre une représentation des comportements distribués et cognitifs des acteurs décisionnels, et dont l'intérêt est de permettre d'étudier la pertinence de changements organisationnels dans ces systèmes.

En effet, l'analyse des conditions d'évolution des systèmes de production et de leur contexte a permis de mettre en relief le besoin de « *réactivité* » pour faire face à un environnement de moins en moins stable et prévisible et devant lequel l'organisation doit chercher des alternatives à un fonctionnement planifié, prédictif, figé et séquentiel. Les réponses organisationnelles des entreprises à ces sollicitations s'expriment par un mouvement vers la flexibilité et l'intégration, et passent par un rapprochement entre la structure décisionnelle et la structure physique.

Pour mettre en évidence cette nouvelle réalité, nous proposons un processus de modélisation qui débute par la construction d'un modèle conceptuel de compréhension des organisations, basé sur une représentation des processus de décision, et sur une formalisation des phénomènes d'orientation des comportements décisionnels. En parallèle, nous analysons les concepts associés à la problématique des systèmes multi-agents, systèmes qui étudient l'émergence de comportements collectifs résultant de l'activité coopérative de plusieurs entités autonomes « intelligentes » sur lesquelles l'expertise est répartie. Ces études convergent vers un modèle de simulation issu des techniques de simulation à événements discrets, dans lequel nous intégrons une modélisation du système décisionnel à base d'agents. Enfin, l'implémentation de ce modèle sera basée sur des techniques de simulation orientée objets (objets actifs, programmation concurrente), et sera validée sur deux exemples, l'un pédagogique et conceptuel, l'autre industriel.

MOTS-CLES

Système production, Organisation, Prise décision, Systémique, Simulation, Intelligence Artificielle, Orienté Objet.